

VYSOKÁ ŠKOLA BÁŇSKÁ - TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA
FAKULTA STROJNÍ
KATEDRA AUTOMATIZAČNÍ TECHNIKY A ŘÍZENÍ

SYNTÉZA NELINEÁRNÍCH SYSTÉMŮ ŘÍZENÍ
NONLINEAR CONTROL SYSTEMS SYNTHESIS

Autor práce: Bc. Marek Hýl
Vedoucí práce: doc. Ing. Renata Wagnerová, Ph.D.

Ostrava 2015

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Marek Hýl**
Studijní program: N2301 Strojní inženýrství
Studijní obor: 3902T004 Automatické řízení a inženýrská informatika
Téma: **Syntéza nelineárních systémů řízení**
Nonlinear Control Systems Synthesis
Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

1. Popište použití Hammersteinova a Wienerova modelu pro identifikaci nelineárních systémů a na zvolených příkladech je demonstруйте.
2. Seznamte se s využitím Identification toolboxu pro určení Hammersteinova a Wienerova modelu a na zvoleném modelu ověřte jeho využití pro experimentální identifikaci.
3. Vybrané přístupy k syntéze nelineárních systémů řízení demonstруйте na vhodně zvoleném modelu.
4. Správnost návrhu řízení ověřte jak pomocí číslicové simulace, tak i přímo na laboratorním modelu.
5. Zhodnoťte dosažené výsledky a navrhněte směr dalšího řešení.

Seznam doporučené odborné literatury:


BOBÁL, V. Adaptivní a prediktivní řízení. 1. vydání. Zlín: Univerzita Tomáše Bati, Fakulta aplikované informatiky, 134 s. 2008. ISBN 80-7318-662-3.
DOSTÁL, P. & MATUŠŮ, R. Stavová a algebraická teorie řízení. Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 90 s., 2010. ISBN 978-80-7318-991-4.
GIRI, F., ET AL. Hammerstein Model Identification. MED 2002 [online]. 2002, č. 193, [cit. 2010-11-01]. On-line available: <<http://med.ee.nd.edu/MED10/pdf/193.pdf>>.
NELLES, O. Nonlinear System Identification. Germany : Springer, 2001. 422 s

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí diplomové práce: **doc. Ing. Renata Wagnerová, Ph.D.**

Datum zadání: 13.12.2014

Datum odevzdání: 18.05.2015


doc. Ing. Renata Wagnerová, Ph.D.
vedoucí katedry




doc. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.
děkan fakulty

Prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě

.....

Bc. Marek Hýl

Prohlašuji, že

- byl jsem seznámen s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. – autorský zákon, zejména §35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a §60 – školní dílo.
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen VŠBTUO) má právo výdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užít (§35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že jeden výtisk diplomové práce bude uložen v Ústřední knihovně VŠB-TUO k prezenčnímu nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové práce. Souhlasím s tím, že údaje o diplomové práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu §12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě

.....

Bc. Marek Hýl

Bc. Hýl Marek

Jičínská 788,

742 58 Příbor

ANOTACE DIPLOMOVÉ PRÁCE

HÝL, M. *Syntéza nelineárních systémů řízení*. Ostrava: katedra ATR-352 VŠB-TU, 2015. 65s. Diplomová práce, vedoucí doc. Ing. Renata Wagnerová, Ph.D.

Tato práce se zabývá syntézou nelineárních systémů řízení. V úvodní části je teoreticky popsána problematika nelineárních systémů, větší pozornost je věnována použití Hammersteinova a Wienerova modelu pro popis vlastností nelineárních systémů. Dále se práce zabývá využitím System Identification Toolboxu pro určení Hammersteinova a Wienerova modelu při experimentální identifikaci, funkčnost toolboxu je ověřena na zvoleném modelu. V další části práce jsou popsány vybrané přístupy k syntéze nelineárních systémů řízení, přístupy jsou demonstrovány na zvoleném modelu. Správnost návrhu řízení je v práci ověřena jak pomocí číslicové simulace, tak i přímo na reálném laboratorním modelu. Výsledky provedených simulací a reálných měření jsou zpracovány graficky, průběhy veličin jsou zhodnoceny a byl navrhnut směr dalšího řešení.

Klíčová slova: Nelineární systém, Hammersteinův model, Wienerův model, System Identification Toolbox, Identifikace, Syntéza, Regulace, Kompenzace nonlinearity

ANNOTATION OF DIPLOMA THESIS

HÝL, M. *Nonlinear Control Systems Synthesis*. Ostrava: Department of Control Systems and Instrumentation, Technical University of Ostrava, 2015. 65p. Diploma Thesis, Supervisor doc. Ing. Renata Wagnerová, Ph.D.

The thesis deals with Nonlinear Control Systems Synthesis. The problems of nonlinear systems are theoretically described in the introductory part, but main attention is given to the use of Hammerstein and Wiener models for properties description of nonlinear systems. Furthermore, the work shows how to use of System Identification Toolbox for determining Hammerstein and Wiener models in experimental identification. Toolbox functionality is verified with the chosen model. The next section describes selected approaches to nonlinear systems control synthesis and their necessary steps are demonstrated on the chosen model. The control design is verified by using digital simulation as well as on the real laboratory model. Results of simulations and real measurements are graphically processed, courses of variables are evaluated and also other directions for further solutions were suggested.

Key words: Nonlinear systems, Hammerstein model, Wiener model, System Identification Toolbox, Identification, Synthesis, Control, Nonlinearity compensation


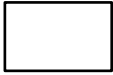
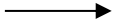
OBSAH

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	7
ÚVOD.....	10
1 NELINEÁRNÍ SYSTÉMY.....	11
1.1 Rozdělení nelinearit.....	11
1.2 Charakteristiky nelineárních členů	11
1.3 Matematický popis nelineárních systémů	15
1.4 Hammersteinův a Wienerův model	16
1.5 Aplikace Hammersteinova a Wienerova modelu.....	18
2 VYUŽITÍ IDENTIFICATION TOOLBOXU PRO URČENÍ HAMERSTEINOVA A WIENEROVA MODELU	23
2.1 Práce se System Identifiacion Toolboxem.....	23
2.2 Ověření funkčnosti System Identification Toolboxu	27
3 TEPLOVZDUŠNÝ MODEL	32
3.1 Popis komponent	33
3.2 Zapojení úlohy	36
3.3 Software	37
3.4 Identifikace systému pomocí System Identification Toolboxu	40
3.5 Identifikace systému - dvoubodová metoda	43
4 SYNTÉZA NELINEÁRNÍCH SYSTÉMŮ ŘÍZENÍ	47
4.1 Zvolené přístupy k syntéze	47
4.2 Návrh regulátorů.....	49
4.3 Simulační ověření vybraných přístupů syntézy	50
4.4 Měření na reálném laboratorním modelu	53
5 ZÁVĚR	56
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	59
SEZNAM PŘÍLOH.....	61

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

ATR	Katedra automatizační techniky a řízení
CFC	Continuous Function Chart - volně propojované bloky
CTRL	Označení konektoru
FBD	Function Block Diagram - funkční blokové schéma
HM	Hammersteinův model
IL	Instruction List - instrukční list
ITAE	Integral of Time multiplied by Absolute Error
LD	Ladder Diagram - kontaktní schéma
MNDP	Metoda násobného dominantního pólu
MPM	Metoda požadovaného modelu
NTC	Negative Temperature Coefficient - termistor s negativním teplotním koeficientem
OLE	Object Linking and Embedding - propojení a vkládání objektů
OPC	OLE for process control - sada protokolů
PI	Proporcionálně integrační regulátor
PID	Proporcionálně integračně derivační regulátor
PLC	Programmable Logic Controller – programovatelný logický automat
PSD	Výkonová hustota [-]
PTC	Positive Temperature Coefficient - termistor s pozitivním teplotním koeficientem
SIMC	Simple control
RS-232	Standard pro komunikaci sériového portu, Recommended Standard 232
SFC	Sequential Function Chart – sekvenční funkční diagram
ST	Structured Text – strukturovaný text
TVM	Teplovzdušný model
UEM	Univerzální experimentální metoda
USB	Universal Serial Bus - univerzální sériová sběrnice
VŠB-TU Ostrava	Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava
WM	Wienerův model
a	Konstanta
a_i	Koeficienty mnohočlenu, hodnoty vektoru
b	Konstanta

b_i	Koeficienty mnohočlenu, hodnoty vektoru
B	Konstanta
e	Regulační odchylka
\mathbf{f}	Vektor nelineárních funkcí
$G(s)$	Přenos
\mathbf{h}	Vektor nelineárních funkcí
k	Směrnice přímky
k_1	Zesílení
k_p^*	Zesílení regulátoru
kT	Diskrétní čas
m	Rozměr
M	Moment tření
M_0	Moment klidového tření
n	Rozměr
Q	Průtok [ml/min]
r	Rozměr
s	Komplexní proměnná [s^{-1}]
S	Suma absolutních hodnot rozdílů
t	Čas
T_1	Časová konstanta [s]
T_d	Dopravní zpoždění [s]
T_D^*	Derivační časová konstanta [s]
T_I^*	Integrační časová konstanta [s]
tg	Funkce tangens
u	Vstupní signál, akční veličina
$\mathbf{u}(t)$	Vektor řídicích proměnných
v	Poruchová veličina
w	Žádaná veličina
$\mathbf{x}(t)$	Stavový vektor
x_H	Funkce Hammersteinova modelu
x_W	Funkce Wienerova modelu
y	Výstupní signál
y^{-1}	Inverzní funkce
$\mathbf{y}(t)$	Vektor výstupních proměnných
Z	Operátor přímé Z-transformace

γ	Úhel [°]
κ	Relativní překmit [%]
	Nelineární systém (prvek, člen)
	Lineární systém (prvek, člen)
	Jednorozměrový signál

ÚVOD

V praxi se často setkáváme se systémy, které vykazují nelineární vlastnosti, a to jak statické, tak i dynamické. Práce s nelineárními systémy z hlediska řízení je velmi náročná, důvodem je skutečnost, že jejich matematické modely nevyhovují podmínce linearity. Vlastnosti nelineárních systémů mohou způsobovat jevy jako: parametrické kmity, vyšší a nižší harmonické kmity, autooscilace, chaos, atd. Omezený význam u nelineárních systémů mají časové a kmitočtové charakteristiky, stejně jako použití integrálních transformací. Lokální charakter mají např. stabilita, říditelnost a pozorovatelnost, následkem toho je návrh řízení velice problematický a neexistují jednotné ani univerzální metody pro analýzu a syntézu. V této práci jsou použity metody identifikace systému s využitím Hammersteinova a Wienerova modelu při řízení nelineárních systémů. Jedná se o v praxi nejpoužívanější základní metody, kdy předpokládáme, že se nelineární systém skládá z nelineární statické části a lineární dynamické části, které jsou mezi sebou propojené, ale navzájem se neovlivňují. Podle jejich vzájemné pozice pak hovoříme o Hammersteinově nebo Wienerově modelu systému. Z těchto předpokladů vycházejí způsoby přístupu k syntéze nelineárních systémů řízení, které budou popsány v této práci.

1 NELINEÁRNÍ SYSTÉMY

Řízené systémy, se kterými se běžně v praxi setkáváme, mají vlastnosti nelineárního dynamického systému. V teorii řízení lineárních systémů jsme předpokládali, že statické charakteristiky těchto nelineárních dynamických systémů můžeme linearizovat a jejich vlastnosti vyjádřit pomocí lineárních diferenciálních rovnic s konstantními koeficienty. V těchto případech hovoříme o nelineárních dynamických systémech s tzv. odstranitelnou nelinearitou, tj. předpokládáme, že okolí pracovního bodu na nelineární statické charakteristice lze nahradit lineární funkcí [BALÁTĚ, 2003]. Tento předpoklad umožňuje použití lineární teorie regulace, která je pro analýzu a syntézu regulačního obvodu podstatně jednodušší. Náhrada nelineárního matematického modelu dynamického systému lineárním matematickým modelem se nazývá linearizace. Na rozdíl od lineárních regulačních obvodů, kde jsou všechny členy popsány lineárními rovnicemi, u nelineárních regulačních obvodů je alespoň jeden člen popsán nelineární rovnicí. Statické a dynamické vlastnosti celého nelineárního regulačního obvodu jsou vyjádřeny výslednou nelineární rovnicí, proto svůj význam ztrácí časové a kmitočtové charakteristiky i Laplaceova transformace. U nelineárních systémů neplatí princip superpozice.

1.1 Rozdělení nelinearit

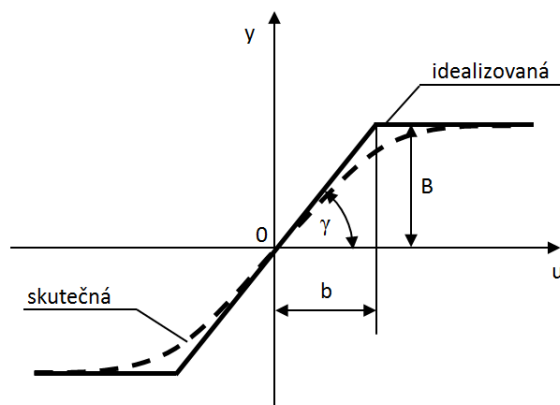
U nelineárních systémů existují dva typy nelinearity - žádoucí a nežádoucí [VÍTEČKOVÁ, 2014]. Žádoucí nelinearity používáme v regulačních obvodech pro zlepšení kvality regulace nebo zjednodušení konstrukce regulátoru. Nežádoucí, neboli parazitní nelinearity zhoršují kvalitu regulace a mají negativní vliv na celý její proces. Mezi příklady obvodů s žádoucími uměle zavedenými nelinearitami patří obvody s dvupolohovými a třípolohovými regulátory a reléové servomechanismy. Tyto regulátory mají jednoduchou konstrukci a jsou vhodné pro určitý druh soustav. Nežádoucí nelinearity jsou většinou způsobeny konstrukční nedokonalostí členů regulačního obvodu.

1.2 Charakteristiky nelineárních členů

V následující podkapitole jsou podrobněji popsány typy základních nelineárních členů, vykresleny jsou jejich charakteristiky i s matematickým popisem. Další typy vyskytujících se nelinearit lze zpravidla považovat za kombinaci základních nelinearit [BALÁTĚ, 2003].

Nasycení

Tato nelinearita se vyznačuje oblastí, ve které se při změně vstupního signálu u téměř nemění výstupní signál y (Obr. 1). Vyskytuje se u zesilovačů s omezením, servomotorů a členů s mechanickými dorazy.



Obr. 1 Charakteristika nasycení

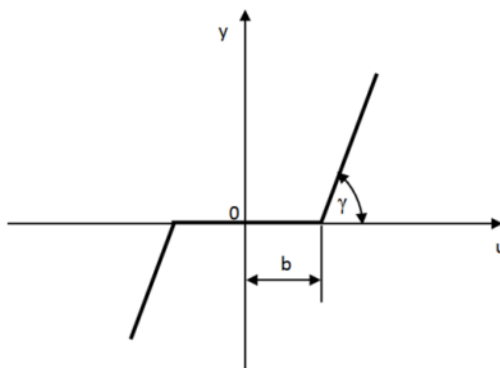
$$y = k \cdot u \quad \text{pro } |u| \leq b \quad (1)$$

$$y = B \cdot \text{sign } u \quad \text{pro } |u| > b \quad (2)$$

$$k = \text{tg } \gamma \quad (3)$$

Pásmo necitlivosti

Charakteristika obsahuje oblast o velikosti $2b$, ve které není citlivá na změny vstupního signálu u (Obr. 2). Většinou ji způsobuje vůle v mechanických členech, překrytí šoupátek u hydraulických a pneumatických zesilovačů, suché tření u servomotorů atd.



Obr. 2 Charakteristika pásma necitlivosti

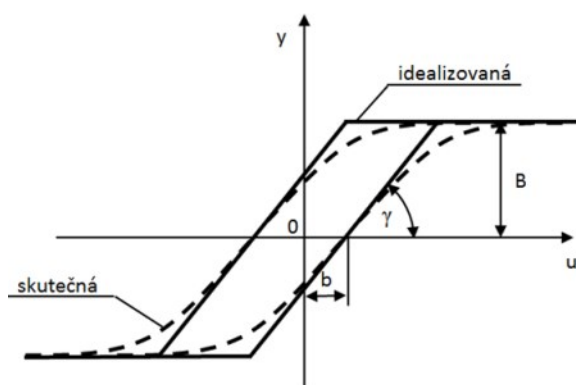
$$y = 0 \quad \text{pro } |u| \leq b \quad (4)$$

$$y = k \cdot u - b \cdot \text{sign } u \quad \text{pro } |u| > b \quad (5)$$

$$k = \text{tg } \gamma \quad (6)$$

Hystereze

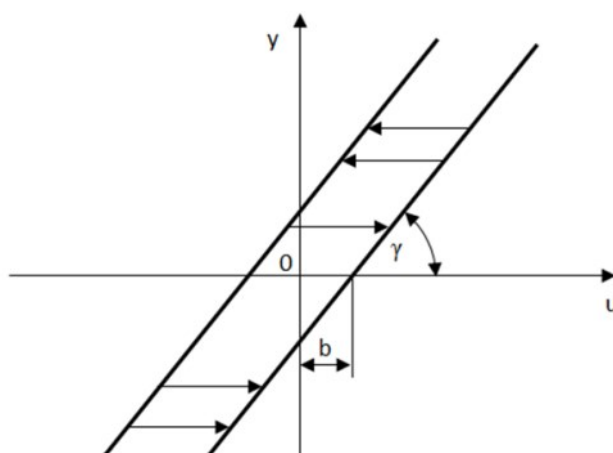
S touto nelinearitou se setkáváme u magnetických a rotačních zesilovačů, kde je způsobena feromagnetickými vlastnostmi železa a u deformačních měřicích přístrojů (Obr. 3).



Obr. 3 Hysterezní charakteristika

Vůle v mechanických převodech

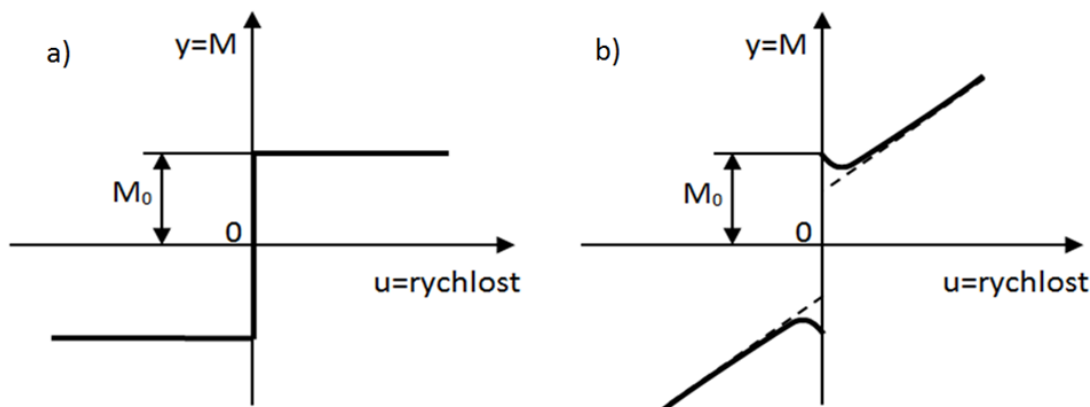
Charakteristika vůle v mechanických převodech má hysterezní tvar, vyskytuje se v regulačních obvodech s pákovými převody a mechanickými reduktory. Vodorovné úsečky zobrazují přechod vůlí, šikmé větve znázorňují přímý záběr (Obr. 4).



Obr. 4 Charakteristika vůle v mechanických převodech

Tření

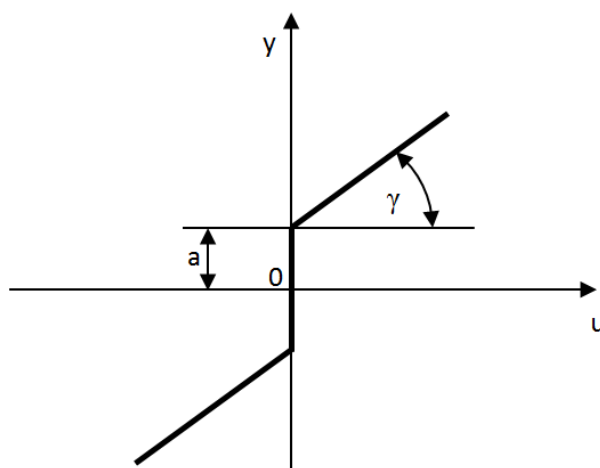
Nelinearitu charakterizující skokovou změnu momentu tření při změně směru rychlosti nazýváme suchým třením (Obr. 5a). Skutečné tření získáme, zkombinujeme-li suché a viskózní tření (Obr. 5b). Nejčastěji se s těmito nelinearitami setkáváme u servomechanismů, při jejich rozběhu musíme nejprve překonat klidové tření M_0 .



Obr. 5 Charakteristiky tření: a) suché tření, b) skutečné tření

Zbytkový signál

Tato charakteristika znázorňuje vlastnosti členů, u kterých se vyskytuje zbytkový signál, někdy je označována jako předepnutí (Obr. 6). Nejčastěji se s ním setkáváme u generátorů stejnosměrného proudu nebo u rotačních zesilovačů elektrického výkonu.



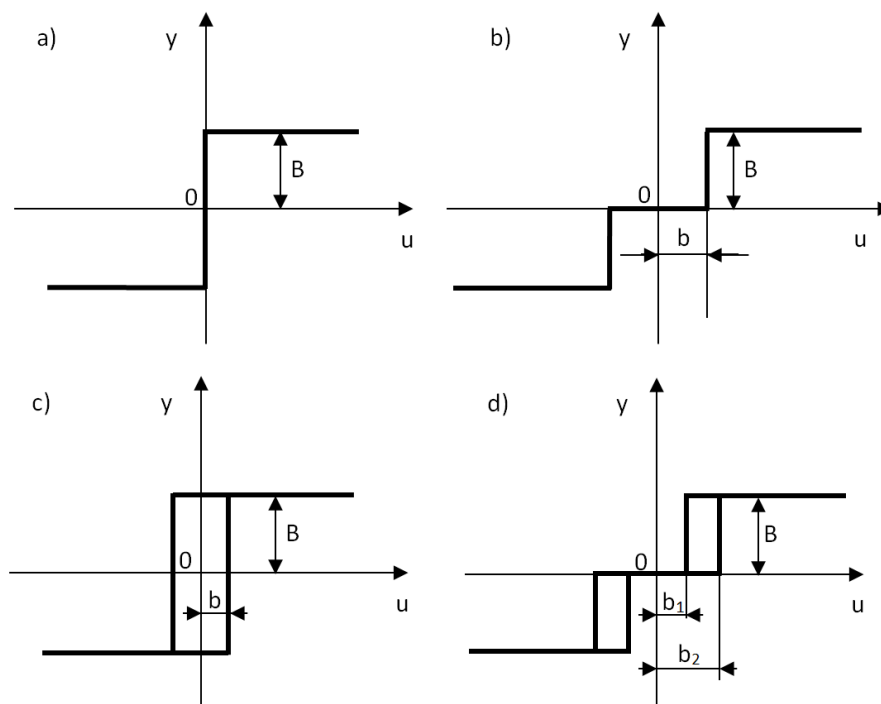
Obr. 6 Charakteristika zbytkového signálu

$$y = k \cdot u + a \cdot \text{sign } u \quad (7)$$

$$k = \text{tg } \gamma \quad (8)$$

Relé

Reléové charakteristiky členů regulačního obvodu jsou charakterizovány tím, že se průběh výstupní veličiny mění nespojitě (skokem) při spojitě změně vstupní veličiny. Existuje několik typů reléových charakteristik (Obr. 7).



Obr. 7 Reléové charakteristiky: a) ideální, b) s pásmem necitlivosti, c) s hysterezí, d) kombinovaná s hysterezí a pásmem necitlivosti

1.3 Matematický popis nelineárních systémů

Nelineární dynamické systémy v časové oblasti popisujeme buďto nelineární diferenciální rovnicí nebo stavovým popisem [BALÁTEĚ, 2003].

Diferenciální rovnice

Diferenciální rovnice je matematicky popsána rovnicí ve tvaru

$$y[y(t), \dot{y}(t), \ddot{y}(t), \dots, y^{(n)}(t)] = u[u(t), \dot{u}(t), \ddot{u}(t), \dots, u^{(m)}(t)] \quad (9)$$

kde: $y(t)$ - je veličina, jejíž průběh hledáme, $\dot{y}(t), \ddot{y}(t), \dots, y^{(n)}(t)$ - její derivace, $u(t)$ - funkce představující budicí vstupní signál, $\dot{u}(t), \ddot{u}(t), \dots, u^{(m)}(t)$ - její derivace, Y, U - jsou nelineární funkce.

Stavový popis

Další možností popisu nelineárního systému je stavový popis

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{f}[\mathbf{x}(t), \mathbf{u}(t), t] \quad (10)$$

$$\mathbf{y}(t) = \mathbf{h}[\mathbf{x}(t), \mathbf{u}(t), t] \quad (11)$$

kde: \mathbf{f} a \mathbf{h} jsou vektory nelineárních funkcí, $\mathbf{x}(t)$ - je stavový vektor dimenze n , $\mathbf{y}(t)$ - vektor výstupních proměnných veličin dimenze m , $\mathbf{u}(t)$ - vektor řídicích (vstupních) proměnných dimenze r a t čas. Tento zápis popisuje nelineární nestacionární dynamický systém, který má r vstupních veličin a m výstupních veličin.

Pro zjednodušení práce s nelineárními systémy se často používá předpoklad, že popisovaný nelineární dynamický systém je stacionární a jednorozměrový, stavový model má poté tvar

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{f}[\mathbf{x}(t), u(t)] \quad (12)$$

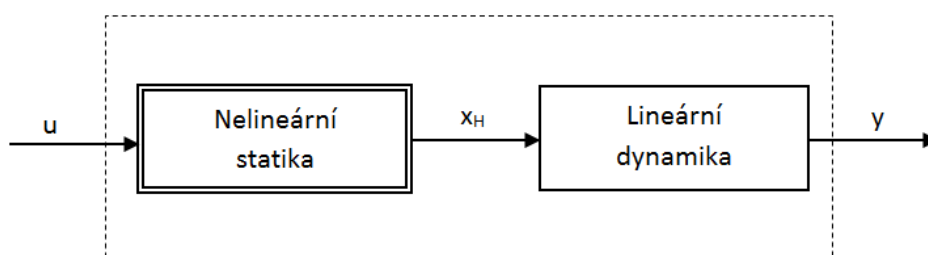
$$y(t) = h[\mathbf{x}(t), u(t)] \quad (13)$$

1.4 Hammersteinův a Wienerův model

Tato kapitola se zabývá metodami identifikace systému s využitím Hammersteinova a Wienerova modelu při řízení nelineárních systémů. Jedná se o v praxi nejpoužívanější metody, kdy předpokládáme, že se systém skládá z nelineární statické části a lineární dynamické částí, které jsou mezi sebou propojené, ale navzájem se neovlivňují. Podle jejich vzájemné pozice pak hovoříme o Hammersteinově nebo Wienerově modelu systému. Postupujeme tak, že nelineární část systému linearizujeme a následně pro tento linearizovaný systém navrhujeme lineární regulátor. U těchto modelů využíváme principů sériové korekce, pomocí které je snadné eliminovat statickou nelinearitu její inverzní funkcí. Velkou výhodou rozdělení systému na nelineární a lineární část je, že stabilita je určena výhradně lineární částí modelu, která může být snadno ověřena. Tyto metody jsou vhodné pro složité systémy vyšších řádů, u kterých nelze použít klasický přístup linearizace systému a následný návrh řízení pro linearizovaný model. V jejich případě by byl výpočet dostatečně přesného linearizovaného modelu velmi náročný. Použití těchto modelů má také některá omezení, protože ne každý systém lze jednoznačně rozložit na vzájemně nezávislou lineární a nelineární část a navíc v praxi nelze předpokládat úplnou stabilitu parametrů systému [BABÍK, 2012].

Hammersteinův model

Použití Hammersteinova modelu je pravděpodobně nejznámější a nejpoužívanější přístup pro modelování nelineárních systémů [BRÁZDIL, 2011]. U tohoto modelu jsou statická nelineární část a dynamická lineární část ve vzájemné poloze dle schématu na Obr. 8. Tato struktura popisuje všechny systémy, ve kterých se nachází dominantní nelineární akční člen (charakteristika ventilu, saturace, pásmo necitlivosti atd.), přičemž ostatní nelinearity jsou zanedbány.



Obr. 8 Schéma Hammersteinova modelu

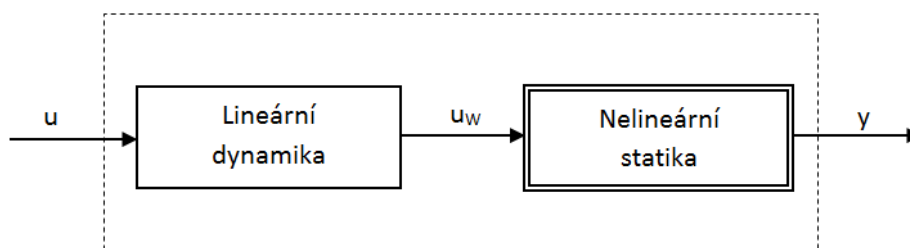
Soustava rovnic vyjadřující Hammersteinův model pomocí diskrétního Z-modelu

$$x_H(k) = f[u(k)] \quad (14)$$

$$y(k) = b_0 x_H(k) + b_1 x_H(k-1) + \dots + b_m x_H(k-m) - a_1 y(k-1) - a_n y(k-n) \quad (15)$$

Wienerův model

U Wienerova modelu jsou statická nelineární část a dynamická lineární část ve vzájemně opačné poloze než u Hammersteinova modelu. Wienerův model se používá u systémů s nelineárními měřicími členy, případně pro návrh řídicího systému [BABÍK, 2012].



Obr. 9 Schéma Wienerova modelu

Soustava rovnic vyjadřující Wienerův model pomocí diskrétního Z-modelu

$$x_w(k) = b_0 u(k) + b_1 u(k-1) + \dots + b_m u(k-m) - \quad (16)$$

$$-a_1 x_w(k-1) - \dots - a_n x_w(k-n)$$

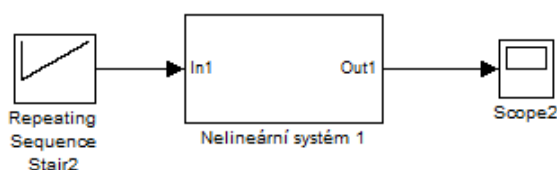
$$y(k) = f[x_w(k)] \quad (17)$$

1.5 Aplikace Hammersteinova a Wienerova modelu

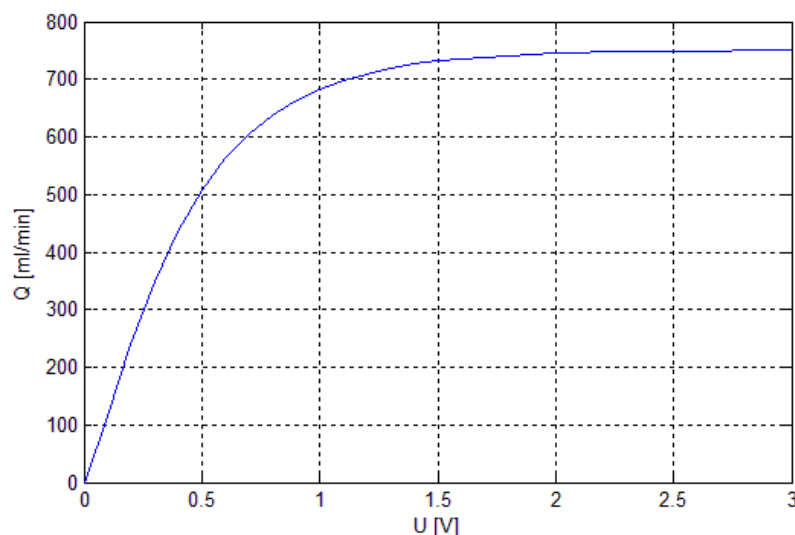
Tato část práce se zabývá praktickým aplikací Hammersteinova a Wienerova modelu pro identifikaci nelineární soustavy. Abychom mohli demonstrovat použití modelů při identifikaci, musíme mít k dispozici nelineární systém. Na základě známých nelineárních statických charakteristik byly v programu MATLAB R2010b byly vytvořeny tři simulační modely nelineárních systémů, každý z nich obsahuje jinou nelinearitu. Pro vypracování byl použit software MATLAB.

Příklad 1

Tento příklad demonstruje použití Hammersteinova modelu, simulační model vychází z reálné statické charakteristiky ventilu, který je určen pro rychlé změny průtoku při malém otevření ventilu. Například při otevření ventilu na 50% může otvorem ventilu procházet průtok až okolo 90% svého maximálního průtoku. Schéma simulačního modelu je zobrazeno na Obr. 10.



Obr. 10 Simulační model - Nelineární systém 1



Obr. 11 Statická charakteristika - Nelineární systém 1

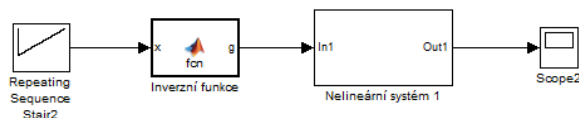
Na základě předpokladu Hammersteinova a Wienerova modelu, že se modelovaný systém skládá z nelineární statické části a lineární dynamické částí, byla z tvaru statické charakteristiky (Obr. 11) pomocí aproximace určena funkce popisující její průběh.

$$y(x) = -748,179 \cdot e^{-2,5577 \cdot x} + 750,3625 \quad (18)$$

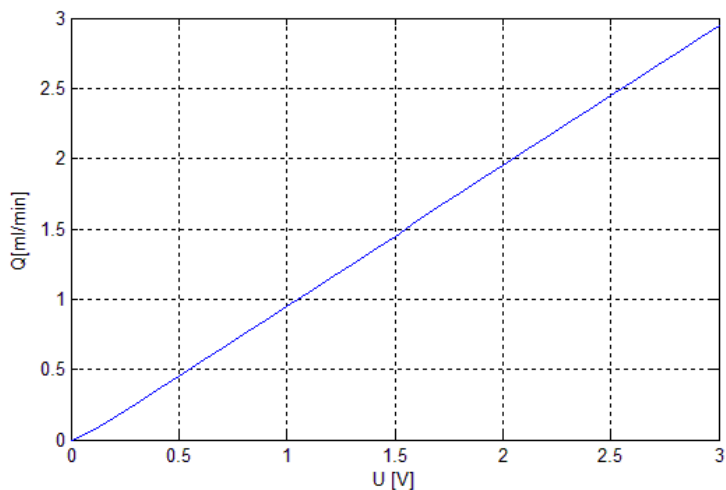
Jednalo se o exponenciální funkci, nelinearita je tudíž exponenciálního charakteru. Ze struktury Hammersteinova modelu vyplývá, že je nutné tuto nelinearitu kompenzovat pomocí inverzní funkce. Pro zjištění inverzní funkce byla použita vestavěná funkce MATLABu `finverse`. Inverzní funkce y^{-1} má tvar

$$y^{-1}(x) = \frac{\ln\left(\frac{x - 750,3625}{748,179}\right)}{-2,5577} \quad (19)$$

Zjištěná inverzní funkce se poté zařadila do simulačního modelu a bylo vytvořeno schéma odpovídající Hammersteinovu modelu (Obr. 12). Správnost identifikace nelineárního systému byla ověřena změnou tvaru statické charakteristiky modelu. Nelinearita ve tvaru exponenciální funkce byla kompenzována a statická charakteristika má nyní lineární průběh (Obr. 13).



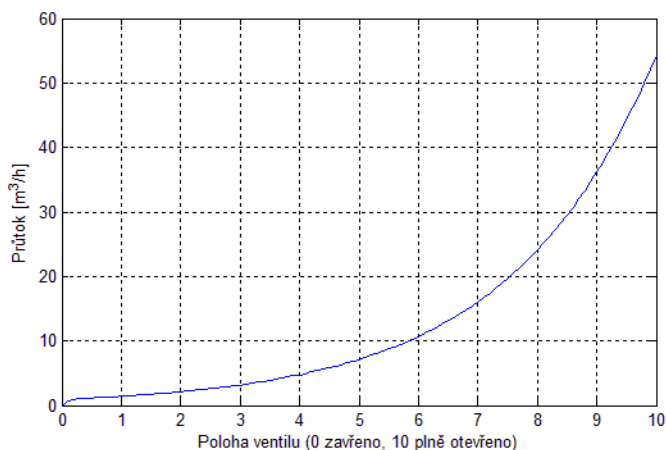
Obr. 12 Simulační model-Nelineární systém 1 s kompenzací nelinearity



Obr. 13 Statická charakteristika - Nelineární systém 1 s kompenzací nelinearity

Příklad 2

V tomto příkladu byl pro demonstraci Hammersteinova modelu vytvořen simulační model s exponenciální statickou charakteristikou (Obr. 14). Postup řešení příkladu je shodný s Příkladem 1.



Obr. 14 Statická charakteristika- Nelineární systém 2

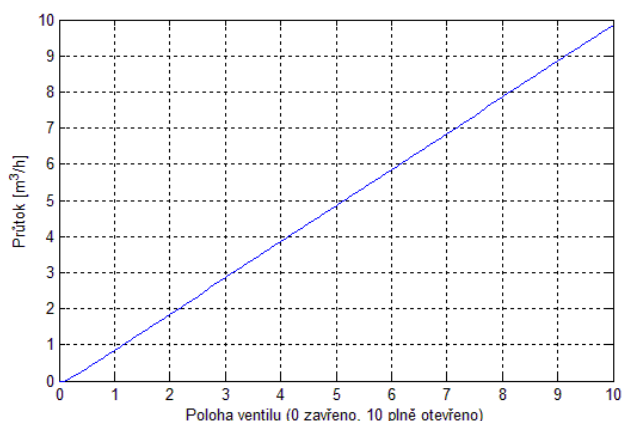
Funkce popisující nelinearitu statické charakteristiky

$$y(x) = 1,5^x \quad (20)$$

Inverzní funkce

$$y^{-1}(x) = -\frac{\ln(x)}{\ln\left(\frac{2}{3}\right)} \quad (21)$$

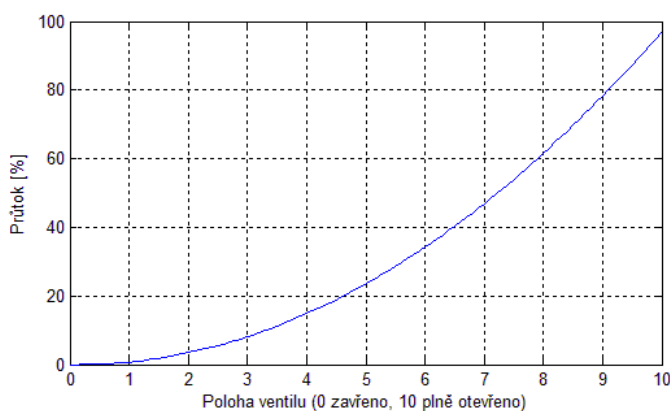
Správnost identifikace nelineárního systému byla opět ověřena a statická charakteristika má opět lineární průběh (Obr. 15).



Obr. 15 Statická charakteristika - Nelineární systém 2 s kompenzací nelinearity

Příklad 3

Ve třetím příkladu byl pro demonstraci Hammersteinova modelu vytvořen simulační model s kvadratickou statickou charakteristikou (Obr. 16). Postup řešení příkladu je shodný s Příkladem 1.



Obr. 16 Statická charakteristika- Nelineární systém 3

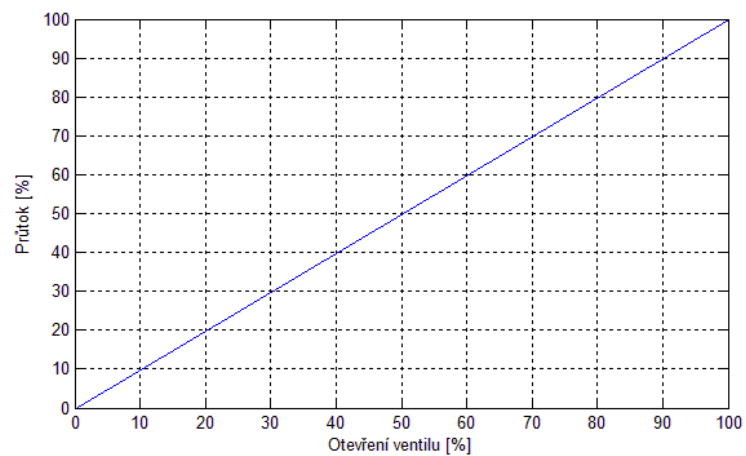
Funkce popisující nelinearitu statické charakteristiky

$$y(x) = x^2 \quad (22)$$

Inverzní funkce

$$y^{-1}(x) = \sqrt{x} \quad (23)$$

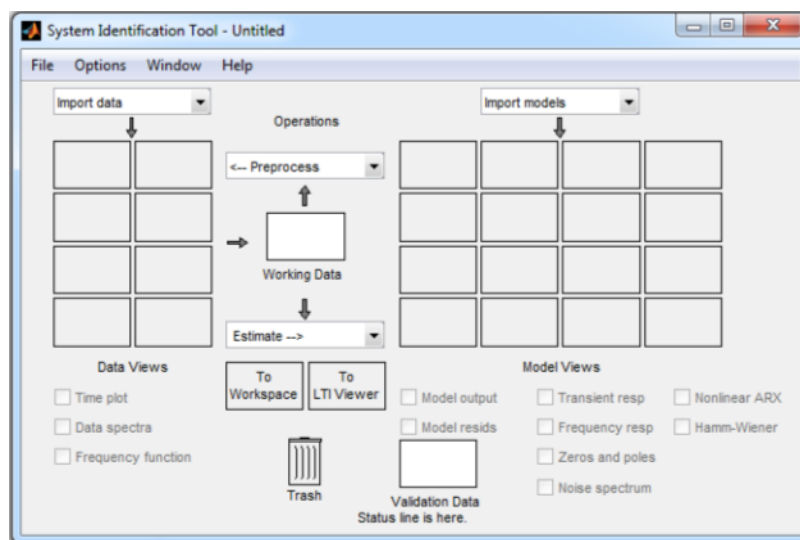
Správnost identifikace nelineárního systému byla opět ověřena a statická charakteristika má opět lineární průběh (Obr. 17).



Obr. 17 Statická charakteristika - Nelineární systém 3 s kompenzací nelinearity

2 VYUŽITÍ IDENTIFICATION TOOLBOXU PRO URČENÍ HAMERSTEINOVA A WIENEROVA MODELU

Ke snadnějšímu modelování Hammersteinových a Wienerových modelů je možno využít System Identification Toolbox. Tento toolbox lze dokoupit jako rozšíření programu MATLAB (Obr. 18). System Identification Toolbox umožňuje navrhovat matematické modely dynamických soustav z naměřených vstupních a výstupních dat. Toolbox pomáhá popsat systémy, které není snadné modelovat pomocí specifikace základních fyzikálních zákonů (chemické procesy, dynamika pohonů). Umožňuje také zjednodušit detailní modely založené na základních fyzikálních zákonech pomocí vhodného nastavení jednodušších modelů při porovnání simulované odezvy na libovolný vstupní signál.

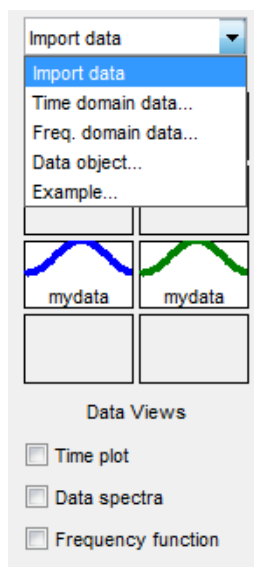


Obr. 18 Aplikace pro System Identification Toolbox - hlavní panel

2.1 Práce se System Identifiacion Toolboxem

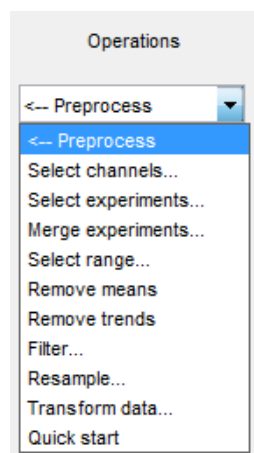
K vyvolání hlavního panelu aplikace System Identification Toolboxu (Obr. 18) slouží příkaz *ident*, který je třeba zadat do příkazového řádku programu MATLAB. Tato aplikace se skládá z několika funkčních tlačítek a oken. V levé části aplikace se nachází rozbalovací tlačítko pro import dat. K dispozici máme několik možností importu dat, můžeme použít data v časové oblasti, frekvenční oblasti nebo data uložená ve formě datového objektu. Po importu se vždy zobrazí malý náhled importovaných dat. Výhodou aplikace je možnost načíst více vstupních a výstupních dat najednou, díky tomu můžeme následně lépe identifikovat neznámý systém a vytvořit tak jeho přesnější model. Tato výhoda je také použitelná v případě, že při modelování pracujeme s jedním typem dat (*Working data*) a pro ověření návrhu používáme jiná data naměřená na stejném systému (*Validation data*). Pracovní a ověřovací data lze

během práce s identifikační aplikací měnit přetažením na požadovaná okna. Data si lze následně zobrazit v grafu pomocí tlačítka *Time plot*, dále je k dispozici také tlačítko pro vytvoření grafu datového spektra a frekvenční funkce (Obr. 19).



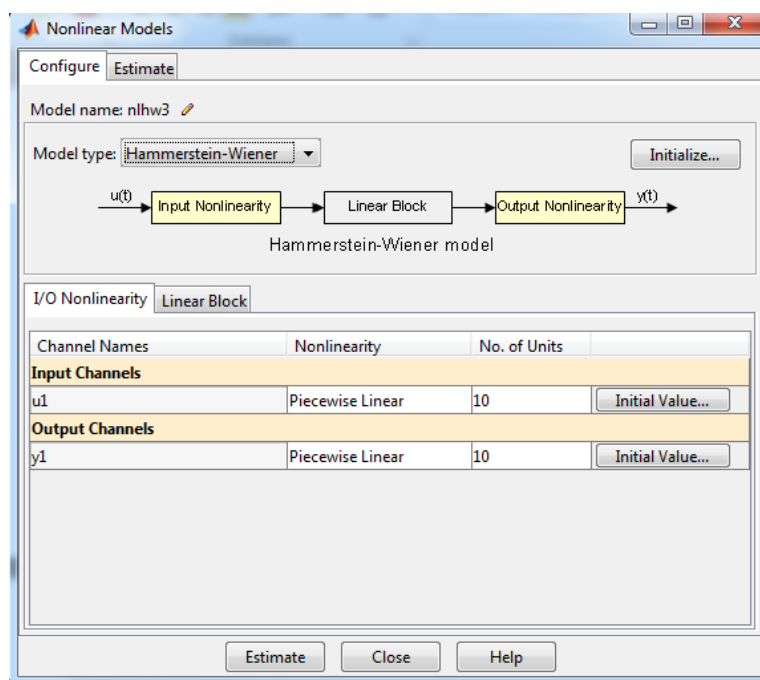
Obr. 19 Možnosti aplikace pro import dat

Pokud již máme úspěšně načtená data, ze kterých budeme identifikovat systém, v aplikaci se nám zpřístupní operace pro předzpracování dat. Díky těmto operacím si lze data upravit do námi požadované podoby, můžeme data například filtrovat, převzorkovat nebo transformovat (Obr. 20).



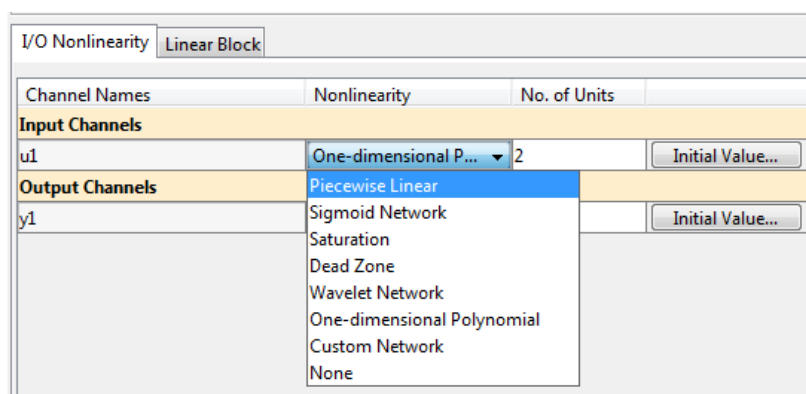
Obr. 20 Možnosti předzpracování dat

Další důležitou funkcí v aplikaci je rozbalovací tlačítko *Estimate*, které určuje, jaký model chceme z načtených dat identifikovat. Pro práci s nelineárními systémy je nutno vybrat položku *Nonlinear models*, poté se nám otevře nabídka pro konfiguraci nelineárního modelu (Obr. 21). Pokud chceme pracovat s Hammerstein-Wienerovým modelem, je nutno jej vybrat v poli *Model type*.



Obr. 21 Okno pro konfiguraci Hammersteinova-Wienerova modelu

V okně pro konfiguraci modelu je zobrazeno blokové schéma Hammersteinova-Wienerova modelu. Ze schématu v Obr. 21 je zřejmé, že tento model kombinuje Hammersteinův a Wienerův model. Model obsahuje nelinearitu na vstupu lineární část a také nelinearitu na výstupu. Pokud chceme modelovat model pouze s jednou nelinearitou na vstupu (Hammersteinův model) nebo na výstupu (Wienerův model), musíme nabídku *I/O nonlinearity* změnit vstupní nebo výstupní nelinearitu na volbu *None*, výsledné schéma se automaticky upraví podle naší volby. Při konfiguraci modelu máme na výběr z několika typů nelinearit (Obr. 22). Nelinearitu nastavujeme na základě znalosti nelineárního systému, který chceme modelovat, například má-li statická charakteristika systému exponenciální charakter, zvolíme volbu *One-dimensional Polynomial*, dále je zde také možnost zadávat počáteční podmínky systému.



Obr. 22 Volba typu nonlinearity

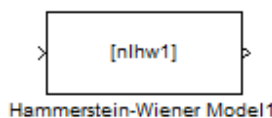
V záložce *Linear Block* nastavujeme parametry lineárního bloku našeho modelu pomocí počtu pólů, nul a dopravního zpoždění. Počet nul lineárního části se zadává ve formátu počet nul plus jedna. V případě, že máme model nakonfigurován dle našich představ, klikneme na tlačítko *Estimate* a tím dojde k výpočtu odhadu identifikovaného modelu. V okně *Nonlinear models* se zobrazí výsledný report výpočtů odhadu modelu a jeho procentuální shoda s načtenými daty. Vpravo v hlavní nabídce se objeví náhled vypočítaného modelu a zpřístupní se funkce pro práci s modelem.



Obr. 23 Funkce pro práci s modelem

K dispozici je možnost zobrazení přechodové charakteristiky modelu, frekvenční charakteristiky, zobrazení jednotkové kružnice s nulami a póly modelu a hlukové spektrum. Důležitou funkcí je funkce *Hamm-Wiener*, kdy se po jejím výběru otevře panel, který zobrazuje grafy nelinearit a charakteristiky identifikovaného modelu.

Nejdůležitějším výstupem System Identification Toolboxu je možnost uložit si identifikovaný systém a následně s ním pracovat. Uložení modelu se provádí přetažením jeho náhledu z pravé části hlavního panelu na tlačítko *To Workspace*. Program MATLAB ukládá vytvořené modely jako typ *idnlhw* a v prostředí SIMULINK je můžeme používat prostřednictvím bloku *Hammerstein-Wiener model* (Obr. 24), kdy do bloku pouze napíšeme jméno modelu. Pro smazání nepotřebných modelů je k dispozici symbol popelnice (*Trash*), kdy se vymazání provádí pouhým přetažením modelu na tento symbol (Obr. 18).



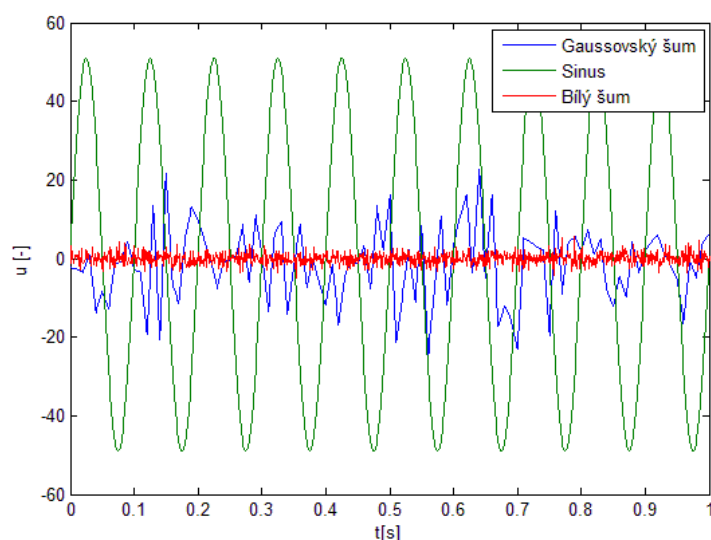
Obr. 24 Blok Hammerstein-Wiener model v prostředí MATLAB-SIMULINK

2.2 Ověření funkčnosti System Identification Toolboxu

Pro ověření funkčnosti System Identification Toolboxu programu MATLAB byl použit nelineární systém příkladu 3 z kapitoly 0. Tento nelineární systém obsahuje nelinearitu na vstupu ve tvaru kvadratické funkce, z toho plyne nutnost použití Hammersteinova modelu. Jelikož System Identification Toolbox vychází při identifikaci ze vstupního signálu u a výstupního signálu y , bylo nejprve nutné vhodně zvolit vstupní signál. Jako vstup byly vybrány tři druhy signálu: gaussovský šum, sinusový signál a bílý šum (Obr. 25). Vstupní signály byly vytvořeny pomocí bloku *Signal Builder* a bloku *Band-Limited White Noise*. Jejich parametry jsou uvedeny v Tab. 1.

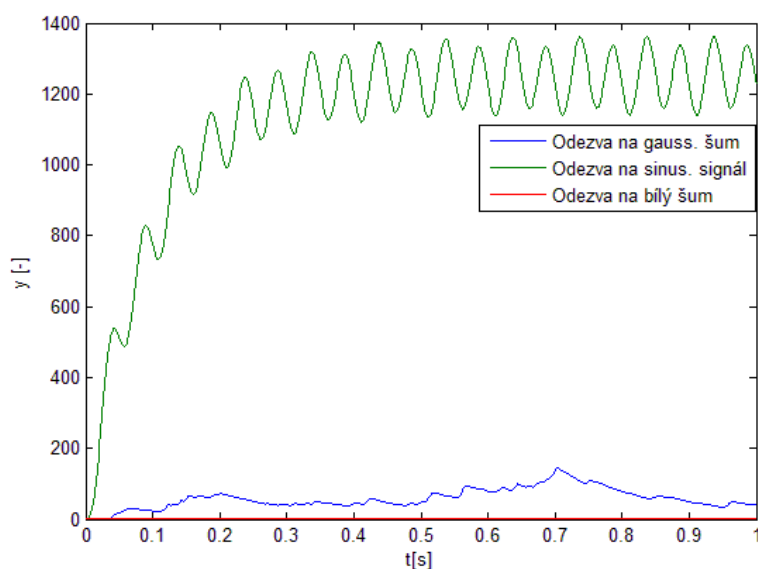
Tab. 1 Parametry vstupních signálů

Sinusový signál	
Frekvence [Hz]	10
Amplituda	50
Offset	1
Počet vzorků na periodu	100
Gaussovský šum	
Frekvence [Hz]	100
Střední hodnota	0
Rozptyl	1
Bílý šum	
Výkonová hustota PSD	0.002
Vzorkovací perioda [s]	0.001
Seed	23341

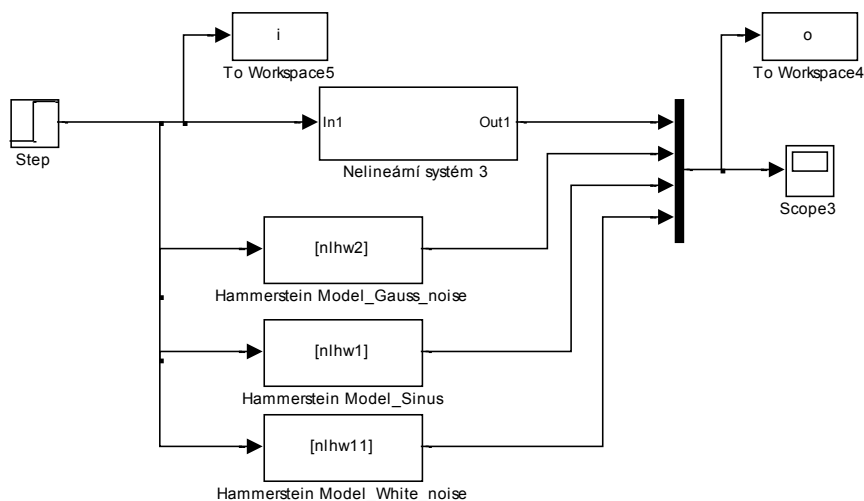


Obr. 25 Průběhy vstupních signálů

Poté byly naměřeny odezvy systému na jednotlivé vstupní signály (Obr. 26). Takto naměřená data byla importována do System Identification Toolboxu a byly provedeny identifikace systému Hammersteinovým modelem pro jednotlivé vstupní a výstupní signály. Vypočtené modely byly pomocí bloků *Hammerstein-Wiener model* převedeny do prostředí MATLAB SIMULINK a bylo vytvořeno simulační schéma pro ověření správnosti identifikace (Obr. 27).



Obr. 26 Průběhy výstupních signálů



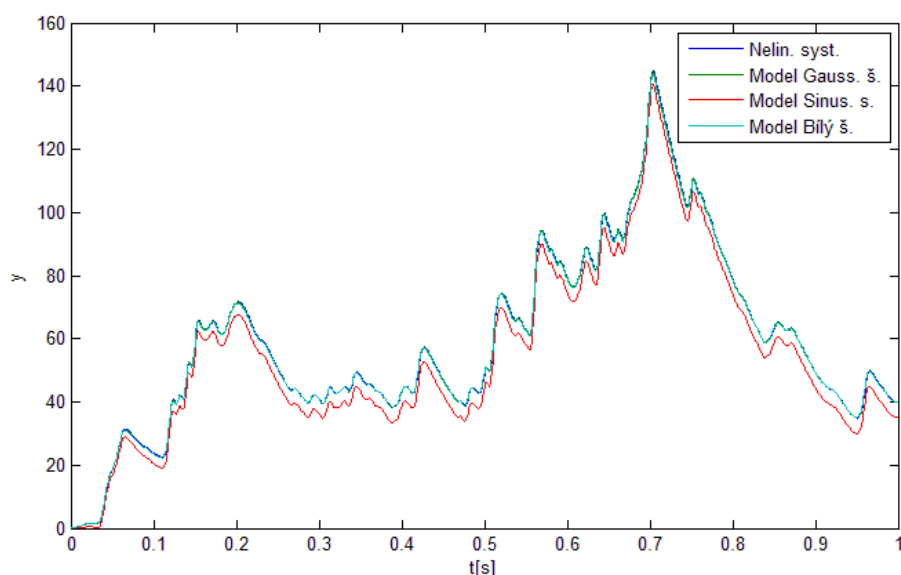
Obr. 27 Simulační schéma - Ověření identifikace

Postupně byly na vstup nelineárního systému a vstupy vytvořených Hammersteinových modelů přiváděny signály různých tvarů a byly sledovány rozdíly výstupních signálů Hammersteinových modelů od výstupního signálu nelineárního systému. Pro snadnější

vyhodnocování úspěšnosti modelování byly vypočteny sumy absolutních hodnot těchto rozdílů

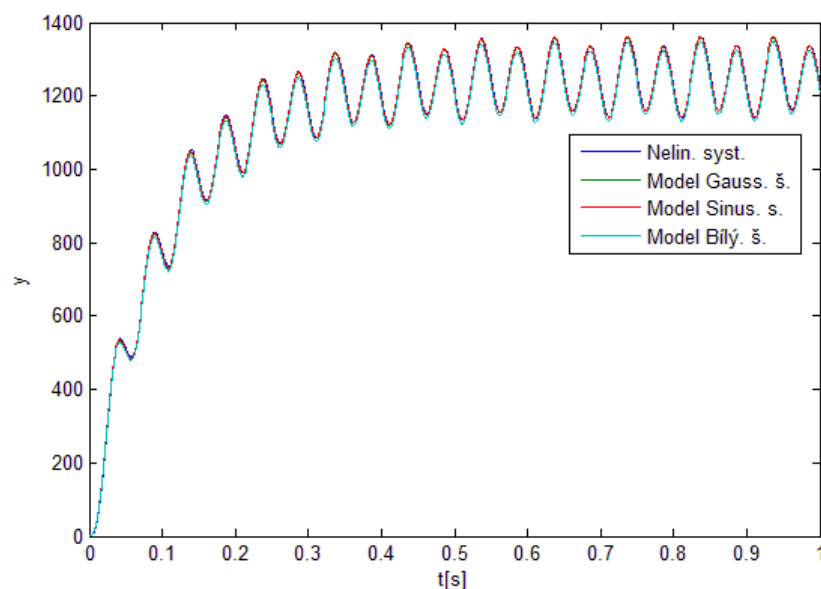
$$S = \sum_{i=1}^n |a_i - b_i| \quad (24)$$

kde a_i je i -tá hodnota výstupního signálu nelineárního systému a b_i je i -tá hodnota výstupního signálu daného Hammersteinova modelu. Výsledky této simulace jsou zpracovány v Tab. 2. Nejlepší odezvu na daný vstupní signál měly vždy modely vytvořené z téhož signálu, tato skutečnost vychází z podstaty postupu při modelování. Nejprve byl na vstup přiveden gaussovský šum, z výsledků vyplývá, že nejlepší shody (po modelu vytvořeném z gaussovského šumu) dosáhl model vytvořený z dat bílého šumu, model vytvořený ze sinusového signálu simuloval s největším rozdílem (Obr. 28).

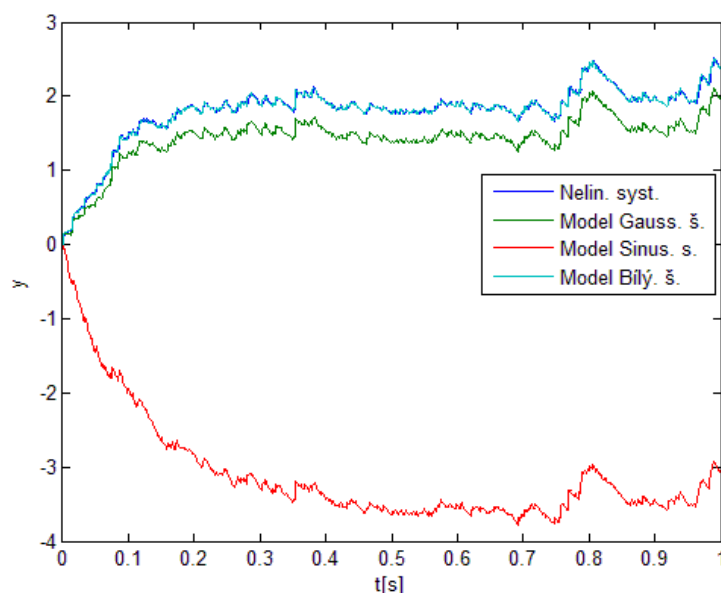


Obr. 28 Odezvy na vstup ve tvaru Gaussovského šumu

Poté byl na vstup přiveden sinusový signál. Z výsledků lze určit, že nejlepší shody dosáhl model vytvořený z gaussovského šumu (Obr. 29).

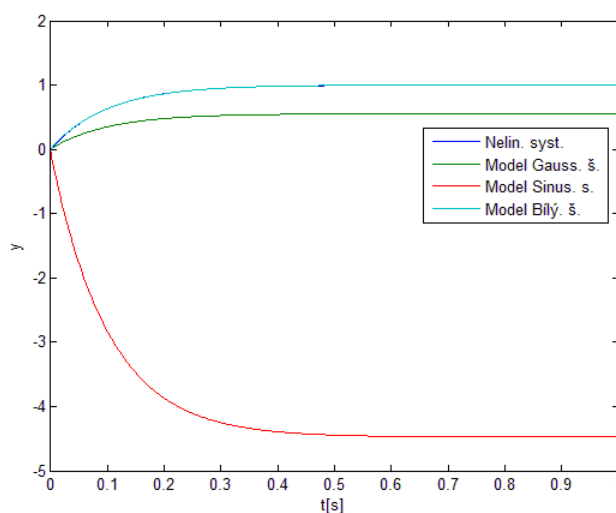


Obr. 29 Odezvy na sinusový vstupní signál

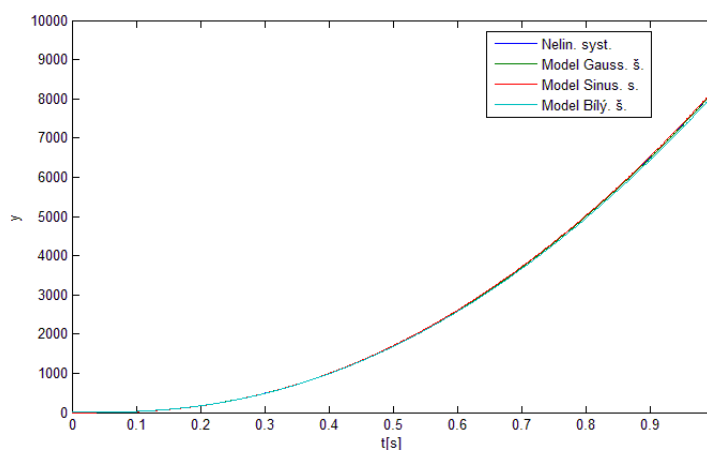


Obr. 30 Odezvy na vstupní signál - Bílý šum

Jako třetí vstupní signál byl použit bílý šum. U této varianty dosáhl lepšího výsledku model vytvořený z gaussovského šumu, model vytvořený ze sinusového signálu měl oproti nelineárnímu systému záporný průběh. Dále byl jako vstupní signál použit jednotkový skok a rampová funkce. Při simulaci odezvy na vstup ve tvaru jednotkového skoku dosáhl nejlepšího výsledku model vytvořený z bílého šumu, průběh jeho odezvy se takřka shodoval s průběhem odezvy nelineárního systému, důkazem shody je i nejnížší hodnota sumy absolutních hodnot rozdílů (Tab. 2). Model vytvořený ze sinusového signálu měl opět opačný tvar odezvy než nelineární systém (Obr. 31). Z odezev na vstup ve tvaru rampové funkce lze určit, že nejlepší shody dosáhl model vytvořený z gaussovského šumu, to dokazuje nejnížší suma absolutních hodnot rozdílů.



Obr. 31 Odezvy na vstup ve tvaru jednotkového skoku



Obr. 32 Odezvy na vstup ve tvaru rampové funkce

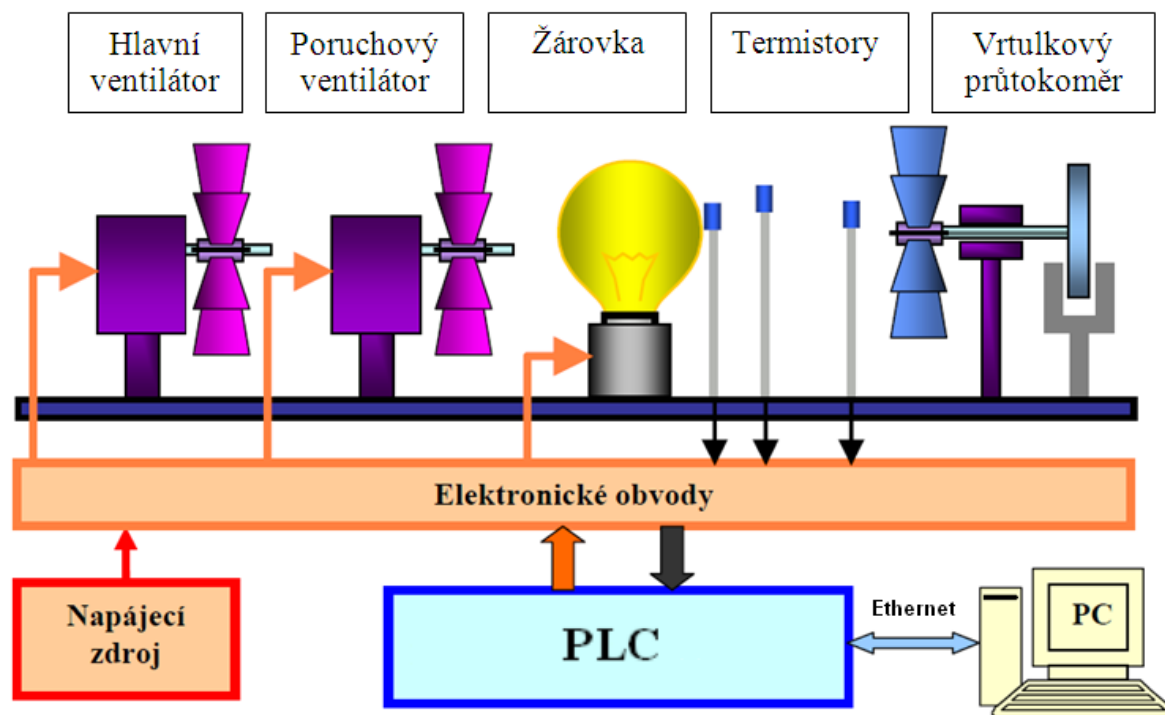
Na základě vypočtených sum absolutních hodnot rozdílů se jako celkově nejlepší jeví model vypočtený z gaussovského šumu. Model vytvořený z bílého šumu dosahoval také dobrých výsledků, pouze u odezvy na rampovou funkci byla jeho odezva dosti nepřesná. Model vytvořený ze sinusového signálu se jevil jako nejhorší, protože průběhy jeho odezev měly většinou odlišné tvary než odezvy nelineárního systému.

Tab. 2 Vyhodnocení modelování - sumy absolutních hodnot rozdílů vypočtené na základě (24)

Vstupní signál	Model 1 (Gaussovský šum)	Model 2 (Sinusový signál)	Model 3 (Bílý šum)
Gaussovský šum	292,3	4239,8	387,8
Sinusový signál	4224,6	3985,1	11670
Bílý šum	360,6	4898,3	19,8
Jednotkový skok	401,7	4932,4	1,2
Rampová funkce	2556,3	10995	23537

3 TEPLOVZDUŠNÝ MODEL

Jako úlohu pro ověření předešlých teoretických znalostí jsem si zvolil laboratorní úlohu teplovzdušného modelu. Teplovzdušné modely (TVM) realizované na katedře ATR představují zjednodušený fyzikální model klimatizační jednotky, v mém případě se jedná o teplovzdušný model z roku 2007. Model je tvořen žárovkou napájenou z ovladatelného zdroje napětí. Žárovka je tepelným i světelným zdrojem a je umístěná v krytém tunelu, kterým je nasáván či vytlačován vzduch pomocí hlavního a případně poruchového (vedlejšího) ventilátoru (ten je rovněž napájen pomocí říditelného zdroje napětí). Tento model umožňuje realizovat jak jednorozměrové, tak mnohorozměrové regulační úlohy. Model teplovzdušného obvodu můžeme ovládat dvěma akčními členy tj. zdroj tepla - žárovka a zdroj proudění vzduchu - hlavní ventilátor. Programátor má možnost volby výstupní (měřené) veličiny, kterou může být teplota měřená snímači umístěnými v různých vzdálenostech od zdroje tepla – žárovka, nebo průtok vzduchu v tunelu měřený vrtulkovým průtokoměrem. V tunelu jsou umístěny tři termistorové snímače teploty, a jeden snímač průtočného množství vzduchu, což je již výše zmíněný vrtulkový průtokoměr. [SMUTNÝ, 2005]. Pro řízení a ovládání této úlohy je využito PLC od firmy ABB. Schéma úlohy je zobrazeno na Obr. 33.



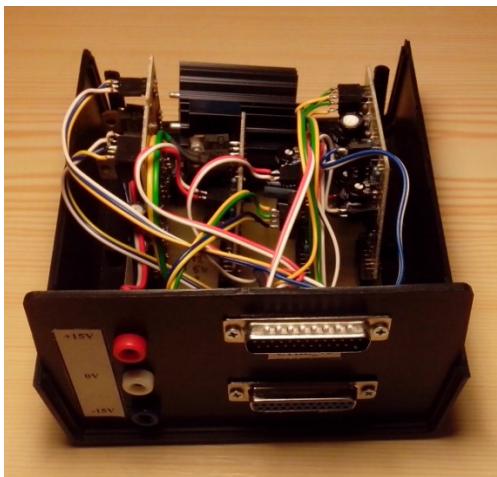
Obr. 33 Schéma úlohy teplovzdušného modelu [HÝL, 2013]

3.1 Popis komponent

Tato kapitola se zabývá popisem konkrétních prvků, které jsou použity v laboratorní úloze - teplovzdušný model.

Unifikační modul

V této součásti modelu jsou umístěny obvody pro vyhodnocení a zesílení signálů. Základem modulu je základní deska. Hlavním účelem základní desky je propojit jednotlivé součástky do fungujícího celku a poskytovat jejich elektrického napájení. Do slotů základní desky propojených společnou sběrnicí se svisle zasouvají jednotlivé bloky pro unifikaci a zesílení, což umožňuje modifikovatelnost celého systému v závislosti na požadavcích reálné úlohy. Jedná se o menší desky s elektronikou k jednotlivým částem teplovzdušného modelu, unifikační modul obsahuje desku pro termistory, desku pro ovládání žárovky, desku pro ovládání ventilátorů a desku pro vrtulkový průtokoměr. Pomocí stabilizátorů je odděleno napájení výkonové části modelu od napájení části zpracovávající signály. Aby nedocházelo k přehřívání desky, je na desku připevněn žebrový chladič. Na přední straně modulu jsou umístěny přístrojové zdířky pro napájení a dva sériové konektory pro připojení soustavy a připojení CTRL jednotky nebo PLC (Obr. 34).



Obr. 34 Unifikační modul bez horního krytu

Pro propojení unifikačního modulu s PLC byl použit jedenácti žilný vodič zakončený konektorem Cannon 25. Zapojení jednotlivých vstupů a výstupů je zobrazeno v Tab. 3.

Tab. 3 Zapojení jednotlivých kontaktů [HÝL, 2013]

Popis	Kontakt
Vstupy do PLC: signály ze snímačů	Cannon 25
ANALOG – Termistor na baňce (NR 354 20K U)	1
ANALOG – Termistor 5 mm od baňky (NR 354 20K U)	2
ANALOG – Termistor na baňce (KTY 81 210)	3
ANALOG – Vrtulkový průtokoměr	4
Výstupy z PLC: akční veličina	
ANALOG – Žárovka	19
ANALOG – Ventilátor (primární)	20
DISKRÉTNÍ – Ventilátor (sekundární, poruchový)	15-18
ZEM	25

Zdroj stejnosměrného napětí

K napájení unifikačního modulu laboratorní úlohy je použit stabilizovaný zdroj stejnosměrného napětí $\pm 15\text{V}$ od firmy Diametral.

Ventilátor

V teplovzdušném modelu jsou použity dva ventilátory, jedná se o ventilátory, které se běžně používají ve stolních počítačích (Obr. 35).



Obr. 35 Ventilátor - Sunon [ALLIEDELEC, 2015]

Vrtulkový průtokoměr

Snímání otáček ventilátorů zajišťuje vrtulkový průtokoměr (Obr. 36). Ten je tvořen vrtulkou, kterou uvádí do otáčivého pohybu kinetická energie proudícího vzduchu a snímačem otáček pro zpracování pulsů ze světelné závory. Rychlost otáčení vrtulky je

úměrná střední rychlosti proudu, procházejícího příčným průřezem tunelu. Základem průtokoměru je monostabilní klopný obvod.



Obr. 36 Vrtulkový průtokoměr

Termistory

Měření teploty uvnitř teplovzdušného modelu je realizováno pomocí tří termistorových snímačů. Termistor je elektrotechnická součástka, jejíž elektrický odpor je závislý na teplotě (Obr. 37). Rozlišujeme dva druhy termistorů - NTC a PTC termistor. NTC je termistor s negativním teplotním koeficientem, což znamená, že se zahřátím součástky jeho odpor klesá. NTC termistor bývá někdy nazýván jako negistor. U PTC termistorů neboli pozistorů odpor při zvyšování teploty mírně klesá, ale po překročení jisté teploty (tzv. Curieovy) strmě vzroste až o několik řádů. Jsou vhodné pro signalizaci překročení dovolené teploty např. elektromotorů, kde jsou zabudovány přímo do vinutí. Jejich velikost umožňuje téměř bodové měření teploty a spolu s vysokou citlivostí splňují tyto součástky základní nároky na miniaturizaci techniky. Nevýhodami termistorů je jejich časová nestabilita a značná nelineární závislost jejich odporu na teplotě [MAREŠ, 2015].



Obr. 37 Příklad termistoru [GME, 2015]

PLC - AC 500 od firmy ABB

Měřicí CTRL jednotka, která byla v úloze v minulosti použita, byla nahrazena PLC. Dnešní notebooky většinou postrádají sériový port, proto pro připojení bylo nutno používat jeho

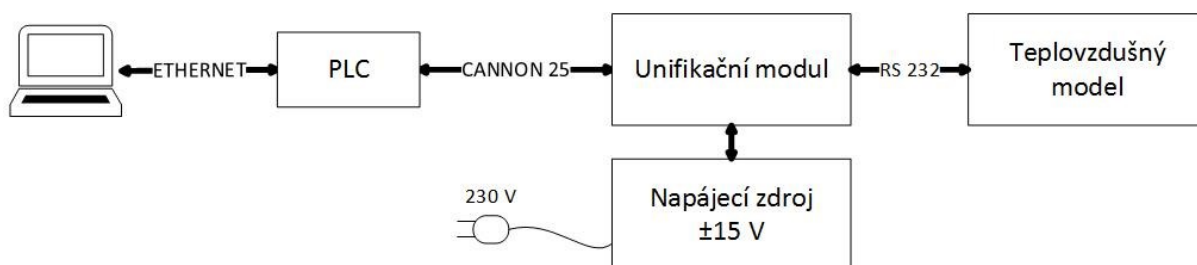
převodník na USB, to mělo za následek, že komunikace modelu s programem MATLAB byla poté pomalá a často docházelo k chybám při čtení hodnot z CTRL jednotky. S použitím PLC se komunikace zrychlila a zkvalitnila. Bylo použito modulární PLC AC500 od firmy ABB, které je možno rozšiřovat nejrůznějšími moduly, dle požadavků uživatele (Obr. 38). PLC je koncipováno jako stavebnice s universálními paticemi a násuvnými moduly bez potřeby další kabeláže. Základem celého systému je řídicí procesor, na který dále připevňujeme jednotlivé potřebné moduly, jako jsou komunikační procesory, I/O moduly, apod. [BUCHTA, 2007]. PLC slouží pro ovládání vstupů a výstupů laboratorní úlohy a zaznamenávání dat ze snímačů otáček a teploty.



Obr. 38 Programovatelný logický automat - AC500 [INDUSTRIAL PARTNERS, 2015]

3.2 Zapojení úlohy

Aby bylo možno pracovat s celou laboratorní úlohou, bylo nutno nejprve propojit jednotlivé komponenty dle schématu na obrázku (Obr. 39). Soustava teplovzdušného modelu je připojena pomocí sériové linky k unifikačnímu modulu, který je napájen externím zdrojem, unifikační modul je připojen k PLC pomocí jedenácti žilného vodiče s konektorem Cannon 25. Počítač je připojen k PLC pomocí ethernetového kabelu.



Obr. 39 Schéma zapojení úlohy

3.3 Software

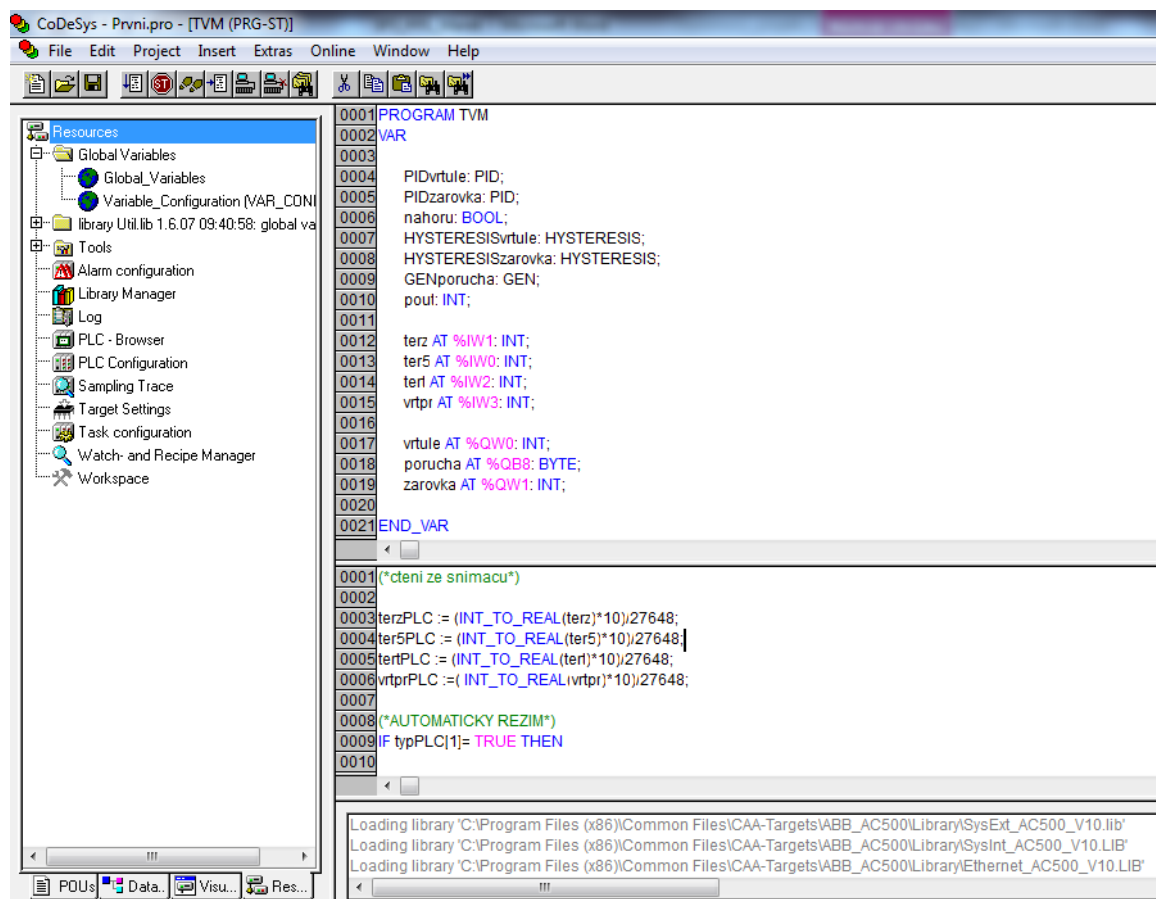
Pro správné fungování a ovládání úlohy je nutné mít v počítači nainstalovány následující programy.

CoDeSys

Abychom mohli pracovat s programovatelným logickým automatem, musíme mít vytvořený program, který v automatu poběží. Programovat PLC lze mnoha různými způsoby. Každý je pak výhodnější pro jiný druh aplikace. Základní programovací režimy standardizuje norma IEC 61131-3, která je spíše známá pod názvem vývojového prostředí CoDeSys (Obr. 40). Tuto normu programovacího jazyka dnes již používá drtivá většina výrobců programovatelných automatů (např.: Siemens, Mitsubishi, Unitronics, Teco atd.). Díky němu je tak možno vytvářet jednotné datové a programové struktury a způsoby ovládání nezávisle na výrobcu a typu PLC, protože „napasování“ na daný hardware probíhá až poté při překladu [VOJÁČEK, 2011]. V prostředí CoDeSys můžeme vytvářet program pro automat v různých programovacích jazycích. K dispozici jsou tyto programovací režimy:

- IL - Instruction List (posloupnost instrukcí)
- ST - Structured Text (vyšší programovací jazyk - obdoba Pascalu)
- LD - Ladder Diagram (kontaktní plán / liniové či reléové schéma)
- SFC - Sequential Function Chart (vývojové schéma)
- FBD - Function Block Diagram (schéma funkčních bloků)
- CFC - Continuous Function Chart (volně propojované bloky)

V mém případě byl v PLC použit projekt vytvořený studentem, který na teplovzdušném modelu pracoval již v minulosti. V programu byly provedeny pouze drobné korekce a projekt byl nahrán do PLC. To bylo připojeno do sítě s počítačem a byla mu přidělena statická IP adresa, přes tuto adresu bylo pak možné přistupovat k PLC, nahrávat program a kontrolovat chod programu. Nevýhodou práce s tímto PLC bylo pouze to, že program musel být při každém spuštění znovu nahrán do PLC z důvodu absence paměťové karty. Dále byl v prostředí CoDeSys OPC configurator vytvořen OPC server, jeho využití a vlastnosti jsou popsány v následujícím odstavci.

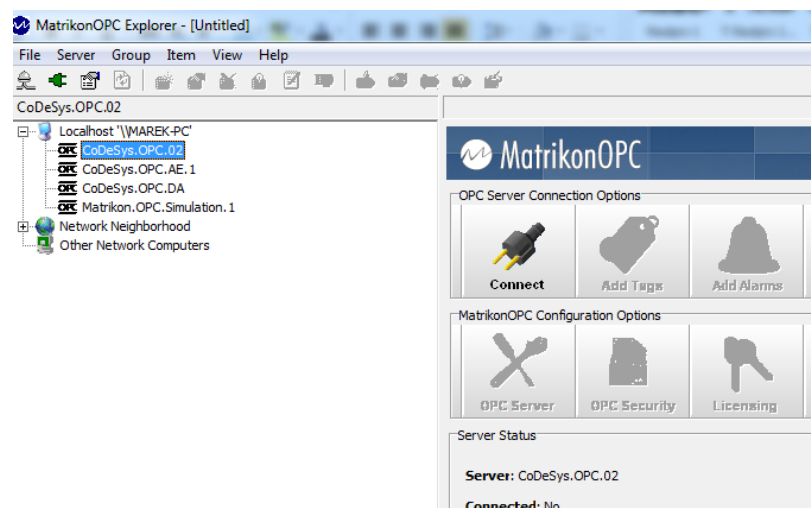


Obr. 40 Ukázka vývojového prostředí CoDeSys

MatrikonOPC Explorer

Komunikační protokol, jehož cílem je vytvořit jednotné komunikační rozhraní mezi hardwarovými a softwarovými produkty průmyslové automatizace se nazývá OPC (OLE for process control). OPC protokoly definují standardní objekty, metody a vlastnosti pro servery poskytující informace v reálném čase (distribuované řídicí systémy, PLC automaty, inteligentní snímače atp.). Informace se v reálném čase přenáší do zařízení (servery, aplikace). Komunikace pomocí protokolu OPC má architekturu klient-server, kde server poskytuje data a komunikuje s fyzickými zařízeními a klient komunikuje se serverem, který provádí požadované operace [FOXON-CZ,2015].

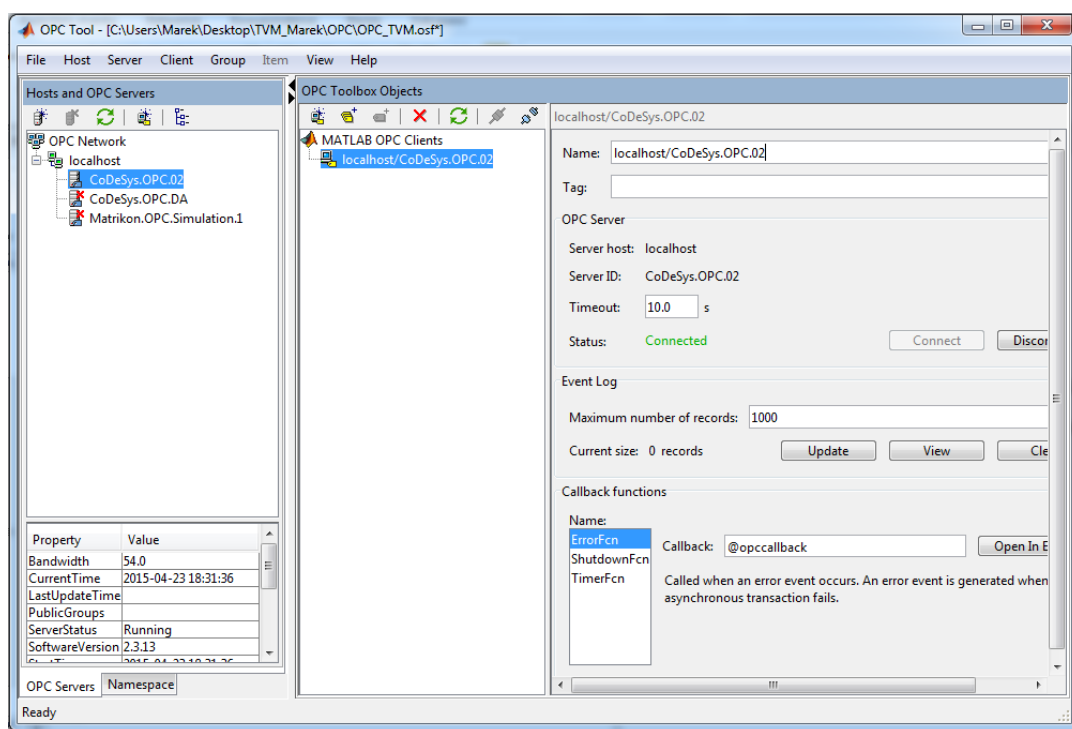
V úloze s teplovzdušným modelem byl pro správu OPC klienta použit volně šiřitelný program MatrikonOPC Explorer (Obr. 41). Jedná se o plnohodnotného OPC klienta, který pomáhá při instalaci, testování a konfiguraci kompatibilních OPC serverů.



Obr. 41 MatrikonOPC Explorer - hlavní okno

MATLAB

Celá úloha teplovzdušného modelu využívala prostředí programu MATLAB. V programu se bylo nutné připojit na OPC server, k této operaci slouží příkaz *opctool* (Obr. 42) Konfigurace jednotlivých vstupů a výstupů modelu byla řešena pomocí m-souborů.



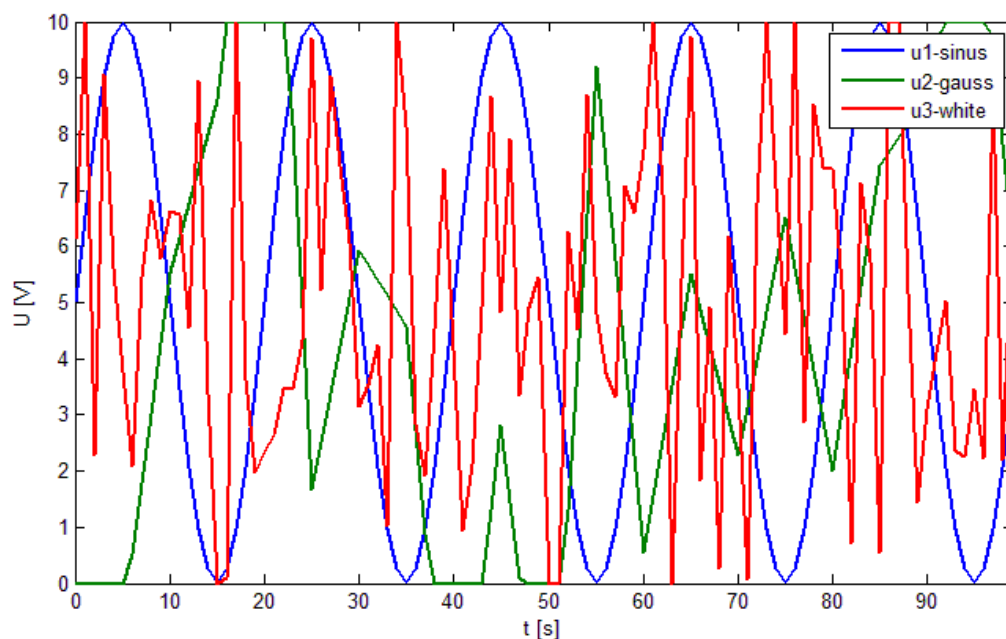
Obr. 42 Konfigurační okno pro OPCtool programu MATLAB

3.4 Identifikace systému pomocí System Identification Toolboxu

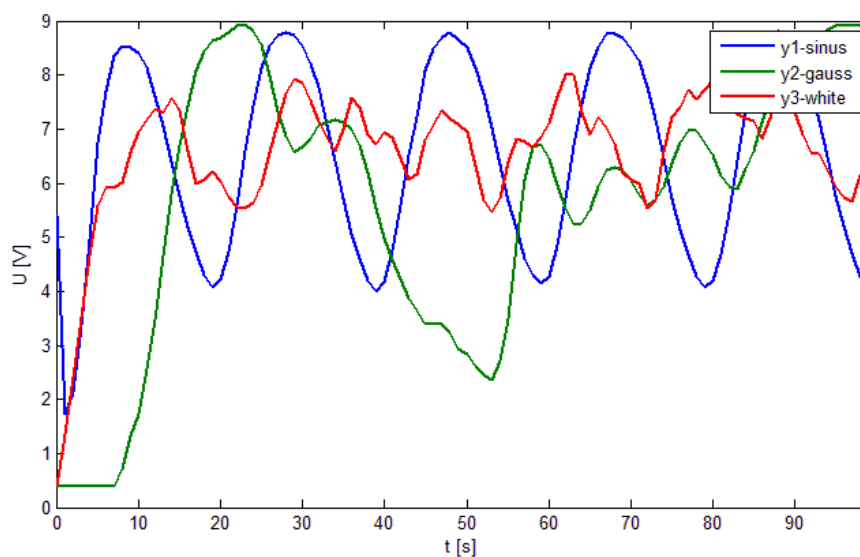
V předešlých kapitolách bylo podrobně popsáno využití System Identification Toolboxu pro určení Hammersteinova a Wienerova modelu. Nyní budou tyto teoretické znalosti aplikovány přímo na reálný laboratorní model. Pro ověření byla vybrána úloha teplovzdušného modelu, konkrétně podsystém vrtulkového ventilátoru. Bylo provedeno experimentální měření a následovala tvorba matematického modelu pomocí System Identification Toolboxu. Postupně byly na vstup systému přiváděny rozdílné vstupní signály a byla měřena odezva systému na tyto signály. Jako vstupní byly použity signály s parametry uvedenými v Tab. 4. Jejich výsledné průběhy jsou zobrazeny na Obr. 43. Průběhy odezev teplovzdušného modelu ilustruje Obr. 44.

Tab. 4 Parametry vstupních signálů pro identifikaci

Sinusový signál	
Frekvence [Hz]	0,05
Amplituda	5
Offset	5
Počet vzorků na periodu	40
Gaussovský šum	
Frekvence [Hz]	0,2
Střední hodnota	5
Rozptyl	5
Bílý šum	
Výkonová hustota PSD	10
Vzorkovací perioda [s]	1
Seed	23341

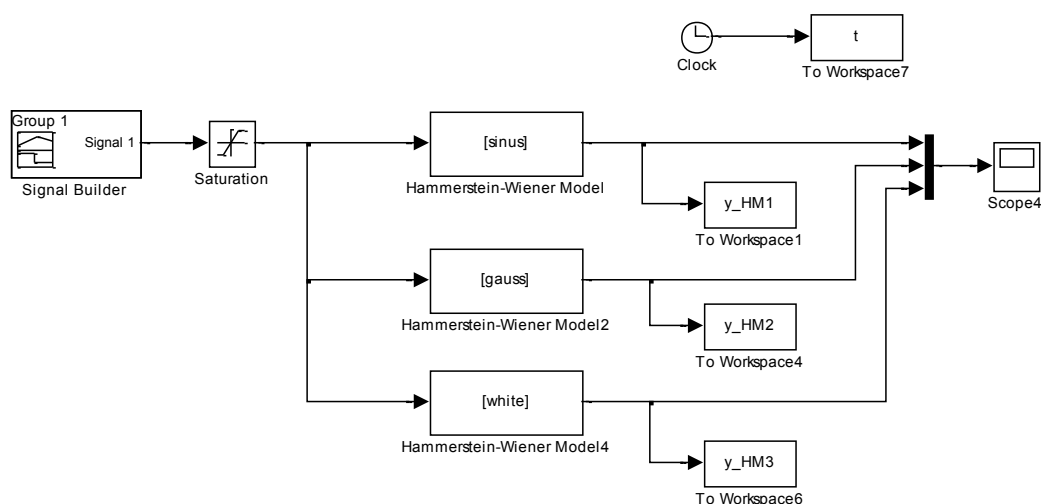


Obr. 43 Průběhy vstupních signálů pro identifikaci



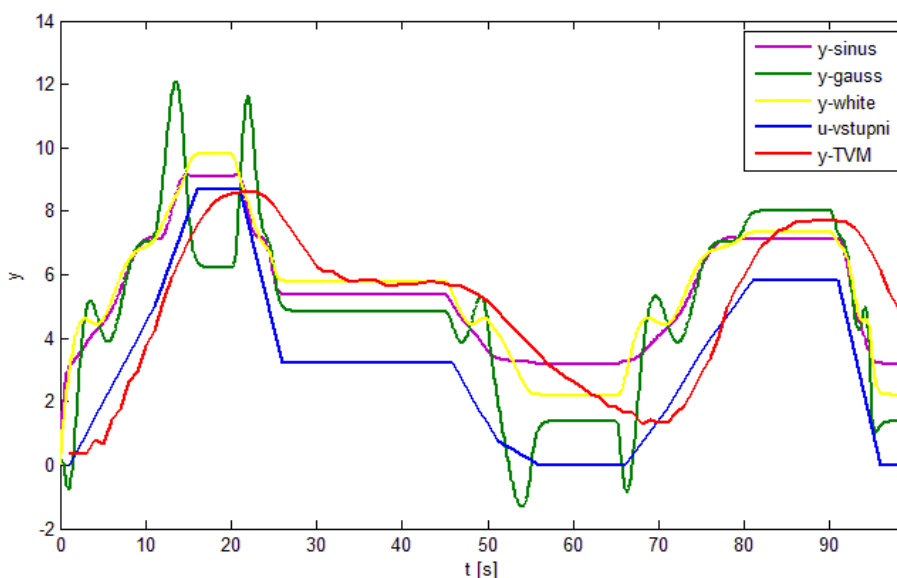
Obr. 44 Průběhy výstupních signálů pro identifikaci

Z časově závislých průběhů vstupních a výstupních signálů bylo pomocí System Identification Toolboxu vytvořeno několik matematických modelů. Jednalo se vždy o modely nelineárního systému se strukturou ve tvaru Hammersteinova modelu. Těchto modelů bylo dosaženo na základě mnoha opakovaných simulací, kdy byly postupně laděny parametry Identification Toolboxu. Nakonec byly vybrány nejlepší tři matematické modely. V teoretické části práce bylo zjištěno, že nejlepších výsledků ze tří modelů dosahoval model vytvořený na základě Gaussovského šumu, následoval jej model vytvořený z bílého šumu a nejhorší byl model ze sinusového signálu. Pro práci s modely byl vytvořen simulační model (Obr. 45).



Obr. 45 Simulační model - Hammersteinovy modely

Následovalo ověření, zda chování modelů bude odpovídat chování reálné úlohy. Na vstup teplovzdušného modelu byl přiveden signál vytvořený pomocí *Signal Builderu* a byla změřena jeho odezva. Ten samý signál byl přiveden na vstup simulačního modelu a byla provedena simulace. Výsledek tohoto ověření je zobrazen v grafu (Obr. 46).



Obr. 46 Ověření kvality simulace

Z grafu je bohužel patrné, že žádný ze tří vytvořených modelů nelze považovat za kvalitně simulující. Nedostatečná kvalita simulace je nejspíše způsobena vlastnostmi teplovzdušného modelu, resp. ze zadaných vstupních a naměřených výstupních dat se metodami, které využívá System Identification Toolbox nepodařilo zjistit dostatek informací o TVM. Další možnou příčinou je nevhodně použitý snímač otáček ventilátoru TVM, kdy snímač není díky své konstrukci schopen dostatečně rychle zaznamenávat změny v otáčení ventilátoru. Z těchto

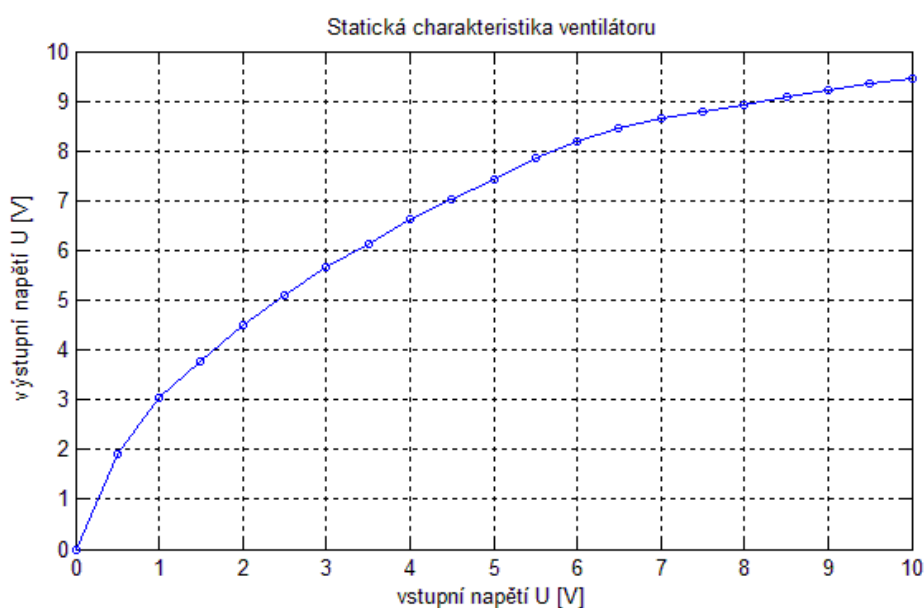
skutečnosti se nabízí závěr, že System Identification Toolbox není vhodný pro identifikaci teplovzdušného modelu Hammersteinovým modelem a je nutno použít jiný přístup identifikace.

3.5 Identifikace systému - dvoubodová metoda

Jelikož se mi nepodařilo vytvořit dostatečně přesný simulační model systému s využitím System Identification Toolboxu pro Hammersteinův model, byl k identifikaci použit klasický přístup. Jednalo se o identifikaci systému na základě aproximace přechodové charakteristiky dvoubodovou metodou s dopravním zpožděním [NOSKIEVIČ, 1999] Metoda byla rozšířena o popis nelineární části systému, tak aby výsledný model systému odpovídal struktuře Hammersteinova modelu. Nelinearitě systému reprezentuje naměřená statická charakteristika, byl identifikován její matematický popis.

Měření statické charakteristiky

Abychom mohli vytvořit model podle Hammersteina, museli jsme nejdříve změřit statickou charakteristiku systému. Statická charakteristika je závislost výstupní veličiny na vstupní veličině v ustáleném stavu. Při měření charakteristiky byly postupně na vstup systému (napětí na ventilátoru) přiváděny skokové změny různých hodnot a byla měřena jejich odezva (napětí ze snímače otáček). Naměřené hodnoty jsou zpracovány do Tab. 5. Výsledná statická charakteristika je zobrazena na Obr. 47. Z tvaru statické charakteristiky je patrné, že se jedná o nelineární systém.



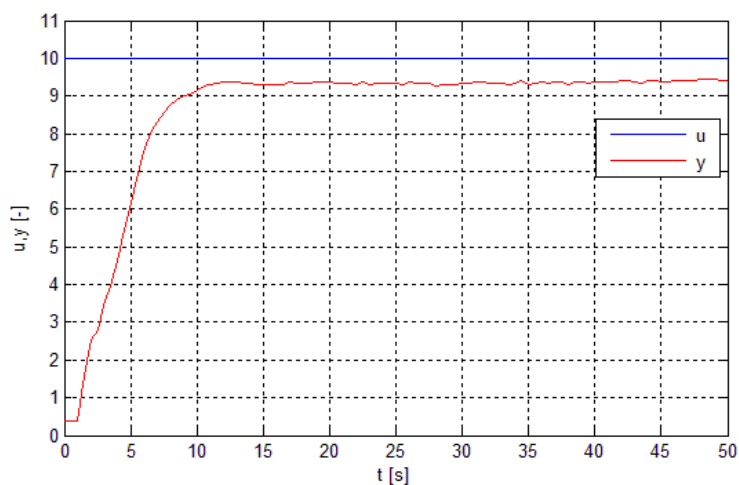
Obr. 47 Statická charakteristika ventilátoru

Tab. 5 Měření statické charakteristiky - hodnoty

Měření	$U_{\text{vstupní}} [\text{V}]$	$U_{\text{výstupní}} [\text{V}]$
1	0,0	0,000
2	0,5	1,921
3	1,0	3,053
4	1,5	3,759
5	2,0	4,494
6	2,5	5,095
7	3,0	5,668
8	3,5	6,146
9	4,0	6,612
10	4,5	7,040
11	5,0	7,416
12	5,5	7,850
13	6,0	8,184
14	6,5	8,464
15	7,0	8,649
16	7,5	8,776
17	8,0	8,929
18	8,5	9,093
19	9,0	9,227
20	9,5	9,355
21	10,0	9,468

Aproximace přechodové charakteristiky

Identifikace systému byla provedena pomocí metody Aproximace přechodové charakteristiky dvoubodovou metodou s dopravním zpožděním. Naměřenou přechodovou charakteristiku systému znázorňuje Obr. 48.



Obr. 48 Přechodová charakteristika ventilátoru TVM

Přenos systému

$$G_{(s)} = \frac{k_1}{T_1 s + 1} \cdot e^{-T_d s} \quad (25)$$

kde k_l je zesílení, T_l je časová konstanta a T_d je dopravní zpoždění.

Hodnoty $y_{0,7}$ a $y_{0,33}$ (resp. $t_{0,7}$ a $t_{0,33}$)

$$y_{0,7} = y_{\infty} \cdot 0,7 = 9,468 \cdot 0,7 = 6,628 \quad (26)$$

$$y_{0,33} = y_{\infty} \cdot 0,33 = 9,468 \cdot 0,33 = 3,124 \quad (27)$$

$$t_{0,7} = 6,03 \quad (28)$$

$$t_{0,33} = 2,911 \quad (29)$$

Vypočtené parametry přenosu

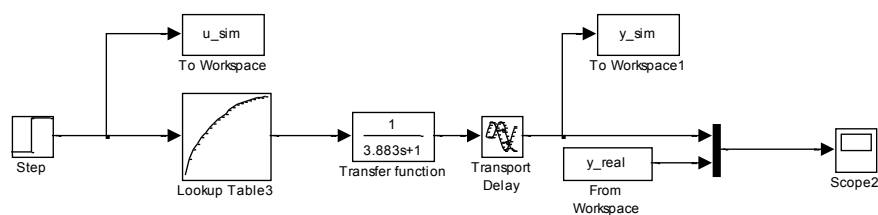
$$\begin{aligned} T_d &= 1,498 \cdot t_{0,33} - 0,498 \cdot t_{0,7} = 1,498 \cdot 2,911 - 0,498 \cdot 6,03 = \\ &= 1,358 \end{aligned} \quad (30)$$

$$T_1 = 1,245 \cdot (t_{0,7} - t_{0,33}) = 1,245 \cdot (6,03 - 2,911) = 3,883 \quad (31)$$

Výsledný přenos systému je

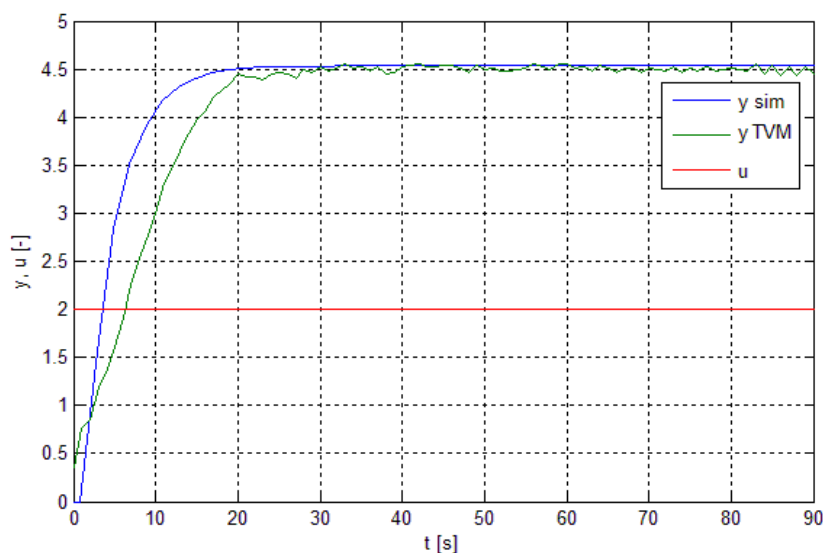
$$G_S(s) = \frac{k_1}{3,883s + 1} \cdot e^{-1,358s} \quad (32)$$

Zesílení k_l je závislé na vstupní veličině u , tato závislost vychází ze statické charakteristiky, která v programu MATLAB byla realizována pomocí *Lookup Table*. Výsledný matematický model svým tvarem odpovídá Hammersteinovu modelu (Obr. 49).



Obr. 49 Simulační model nelineárního systému

Správnost identifikace systému byla ověřena pomocí číslicové simulace. Na Obr. 50 je zobrazen průběh měřené a vypočítané přechodové charakteristiky TVM. Z obrázku je patrné, že experimentální identifikace byla provedena správně a vytvořený matematický model dostatečně přesně sleduje reálný systém. Výhodou tohoto modelu je, že díky zařazení nelineární funkce pro zesílení je model schopný modelovat chování TVM ve všech pracovních bodech a při výpočtech dosahuje lepších výsledků, než kdybychom použili klasický přístup identifikace s linearizací.



Obr. 50 Porovnání simulace s reálným systémem

4 SYNTÉZA NELINEÁRNÍCH SYSTÉMŮ ŘÍZENÍ

V praxi se často setkáváme se systémy, které vykazují nelineární vlastnosti, a to jak statické, tak i dynamické. Práce s nelineárními systémy je náročnější, protože jejich matematický popis je komplikovaný a vyžaduje hlubší znalosti teorie, než popis lineárních systémů. V těchto případech nelze vyjádřit jejich statickou charakteristiku $y=f(u)$ lineární funkcí, přičemž u je vstupní veličina ovlivňující dynamický systém, y je veličina výstupní [BRÁZDIL, 2011]. Tyto procesy není možné optimálně řídit pomocí jednoduché lineární teorie řízení. Pokud se nelineárními systémy zabýváme z hlediska teorie řízení, syntézy regulačních obvodů a kvality regulace, můžeme k nim přistupovat rozdílnými způsoby. V této kapitole budou popsány dva vybrané způsoby přístupu k syntéze nelineárních systémů řízení. Dále se tato část práce zabývá návrhem parametrů regulátorů pro simulační a reálný laboratorní model a samotnou regulací. Výsledky číslicové simulace a reálných měření jsou zde zpracovány do grafů a zhodnoceny.

4.1 Zvolené přístupy k syntéze

Většinou jsme se v teorii řízení setkávali s přístupem, kdy byl nelineární systém nahrazen lineárním systémem, což značně zjednodušovalo syntézu regulačního obvodu. Tato kapitola se však zabývá syntézou nelineárních systémů vhodnou zvláště v případě, kdy lze nelineární systém popsat pomocí Hammersteinova nebo Wienerova modelu. V případě, že máme takovýto nelineární systém, můžeme k syntéze jeho regulačního obvodu použít tyto přístupy.

S kompenzací nelinearity

Tato metoda je použitelná hlavně v případě, kdy známe tvar statické charakteristiky nelineárního systému s oddělenou lineární dynamikou a statickou nelinearitou na vstupu [ŠEBEK, 2013]. Pokud je nelinearita popsána například matematickou funkcí, je možno tuto nelinearitu kompenzovat pomocí její inverzní funkce.

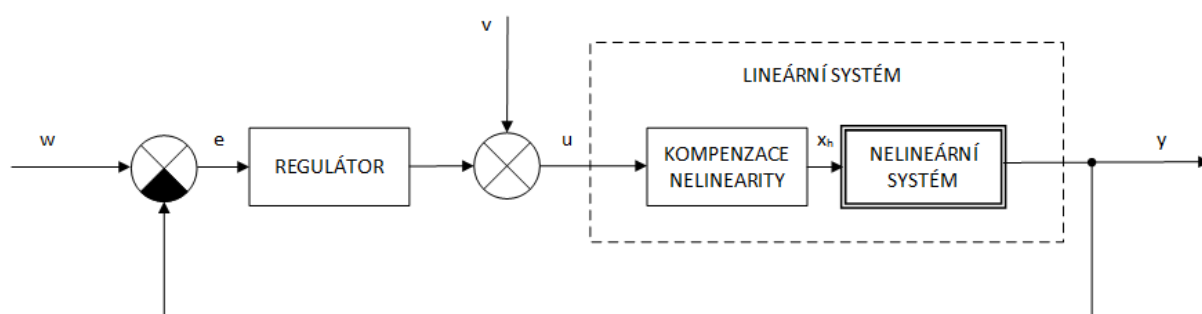
Postup syntézy:

1. Identifikace lineární dynamiky systému
2. Měření statické charakteristiky
3. Vytvoření inverzní funkce pro kompenzaci nelinearity

4. Návrh konvenčního regulátoru pro lineární systém

5. Spojení konvenčního regulátoru a inverzní funkce

Pro identifikaci lineární dynamiky systému můžou být použity například metody experimentální identifikace systému pomocí přechodových charakteristik. Nelineární statické vlastnosti budou popsány pomocí změřené statické charakteristiky systému, kterou je nutné matematicky popsat a vytvořit její inverzní funkci. Ve výsledném simulačním modelu musí být zavedena nelinearita. Výsledné chování identifikovaného systému je pak nelineární. V případě znalosti struktury nelineárního systému, jsme schopni z funkce určující nelinearitu vytvořit blok pro kompenzaci nelinearity (například inverzní funkcí nebo pomocí tabulky hodnot). Pokud již máme systém správně identifikován a vytvořen také blok kompenzující nelinearitu, můžeme o systému říci, že je lineární. Tato skutečnost nám umožňuje seřadit regulátor pro tento lineární systém. K návrhu parametrů regulátoru je možno použít metody, které jsou popsány v [VÍTEČKOVÁ, M. & VÍTEČEK, A. 2008]. Sestavení regulačního obvodu a zapojení jednotlivých bloků regulačního obvodu poté odpovídá schématu na Obr. 51.



Obr. 51 Blokové schéma nelineárního regulačního obvodu s kompenzací nelinearity

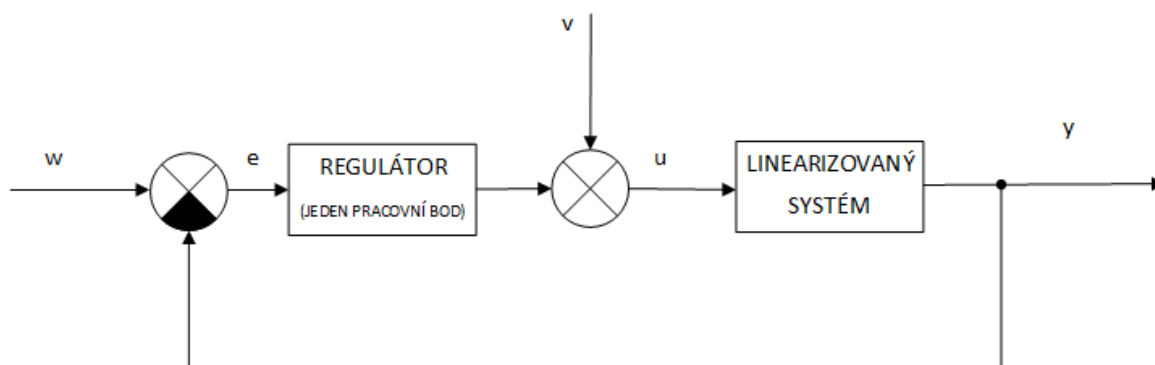
Bez kompenzace nelinearity

Na rozdíl od předchozí metody, se tato metoda nezabývá kompenzací nelinearity systému. Postup syntézy:

- 1) Identifikace linearizovaného systému
- 2) Návrh regulátoru pro linearizovaný systém
- 3) Sestavení simulačního modelu

Při identifikaci lineární dynamiky je dodržen stejný postup jako u předchozí metody. Tím, že vynecháme blok kompenzující nelineární chování systému, nemůžeme dostatečně kvalitně

seřídít parametry regulátoru. Pokud chceme pro tento nelineární systém navrhnout regulátor, musíme systém linearizovat. Linearizace je náhrada nelineárního matematického modelu dynamického systému lineárním matematickým modelem [ATRŽ, 2015]. Pro takto linearizovaný model je poté možné seřídít konvenční regulátor, který bude optimálně fungovat jen v pracovním bodě. Jedná se o tradiční metodu řízení nelineárních systémů, která je založena na předpokladu, že řízení probíhá v malém provozním rozsahu, nebo že nelinearity v pracovním rozsahu jsou slabé [HRABOVSKÝ, 2013]. Nevýhodou tohoto přístupu je, že hodnoty parametrů regulátoru jsou seřizeny pouze pro jeden pracovní bod a jeho nejbližší okolí. Pokud by se pracovní bod posunul, je potřeba provést linearizaci znovu, abychom zachovali stejné vlastnosti regulace. Sestavení regulačního obvodu a zapojení bloků je zobrazeno na Obr. 52.



Obr. 52 Blokové schéma nelineárního regulačního obvodu bez kompenzace nelinearity

4.2 Návrh regulátorů

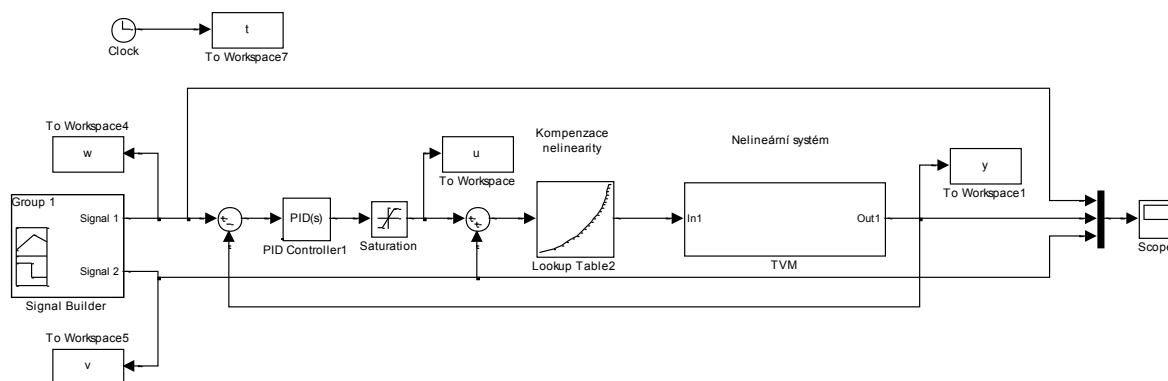
Při návrhu regulátorů byl použit identifikovaný systém ventilátoru TVM z předchozí části práce. Z tvaru identifikovaného přenosu systému vyplývá, že se jedná o proporcionální systém se setrvačností prvního řádu s dopravním zpožděním (32). Data z měření statické charakteristiky systému jsou zpracovány v Tab. 5 a výsledný tvar statické charakteristiky zobrazuje Obr. 47. Pro tento systém byly navrženy parametry regulátorů pomocí Metody násobného dominantního pólu, Metody požadovaného modelu, Univerzální experimentální metody a metody SIMC. Všechny tyto metody deklarují obdobnou kvalitu regulace a minimální překmit. Podrobný popis postupů jednotlivých metod je popsán v [VÍTEČKOVÁ, M. & VÍTEČEK, A. 2008]. Vypočtené parametry regulátorů jsou zobrazeny v Tab. 6.

Tab. 6 Stavitelné parametry regulátorů

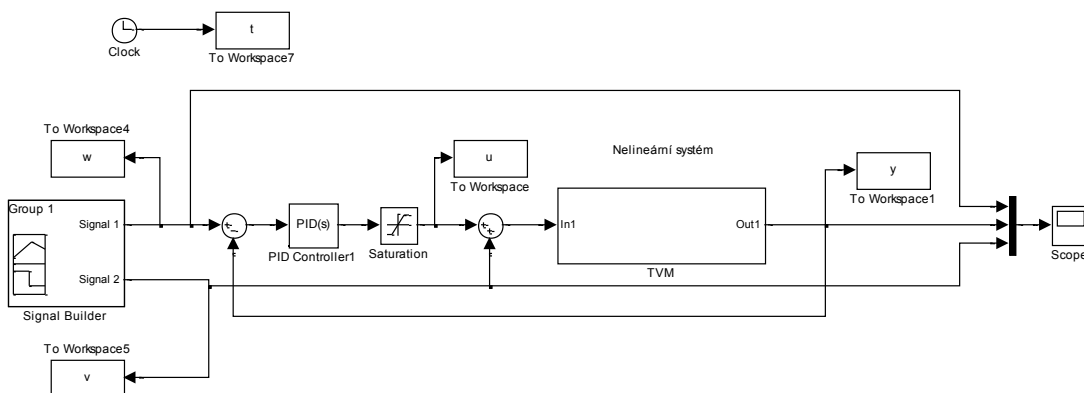
Metoda	Typ regulátoru	k_p^*	T_I^*	T_D^*
Metoda požadovaného modelu [$\kappa=0\%$]	PI	1,110	3,883	-
Univerzální experimentální metoda [$\kappa=0\%$]	PI	1,057	4,543	-
	PID	1,812	3,883	0,679
SIMC	PI	1,510	3,883	-
Metoda násobného dominantního pólu	PI	1,212	3,422	-
	PID	2,223	3,106	0,326

4.3 Simulační ověření vybraných přístupů syntézy

Tato podkapitola se zabývá ověřením vybraných přístupů syntézy nelineárních systémů řízení pomocí číslicové simulace. Na Obr. 53 je zobrazen výsledný simulační model pro přístup syntézy s kompenzací nelinearity. Simulační model pro přístup bez kompenzace nelinearity znázorňuje Obr. 54.



Obr. 53 Simulační model pro ověření syntézy - přístup s kompenzací nelinearity



Obr. 54 Simulační model pro ověření syntézy - přístup bez kompenzace nelinearity

V obou simulačních modelech se vyskytuje blok *saturation* (nasycení), který zaručuje omezení akčních veličin tak, aby model dodržel omezení reálné akční veličiny ventilátoru TVM. Vstupní signály žádané veličiny w a poruchové veličiny v byly vytvořeny pomocí bloku *Signal builder*. Oba tyto signály byly vytvořeny za účelem, aby co nejlépe ověřily robustnost navržených regulátorů. V simulačních modelech byly postupně použity navržené regulátory. Pro hodnocení dosažené kvality regulace jednotlivých regulátorů bylo použito kritérium ITAE. Jedná se o integrální kritérium, které v sobě zahrnuje čas i regulační odchylku, a proto při jeho minimalizaci dochází současně k minimalizaci jak doby regulace, tak i absolutní regulační plochy [VÍTEČKOVÁ, M. & VÍTEČEK, A. 2008]. Výpočet kritéria udává následující vztah

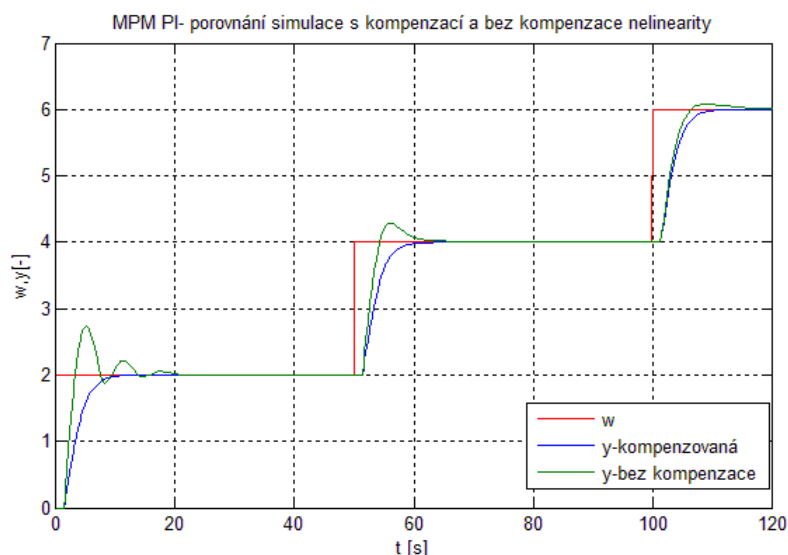
$$I_{ITAE} = \int_0^{\infty} t|e(t)|dt \quad (33)$$

kde e je regulační odchylka a t je čas. Hodnoty kritéria pro jednotlivé simulace jsou zobrazeny v Tab. 7.

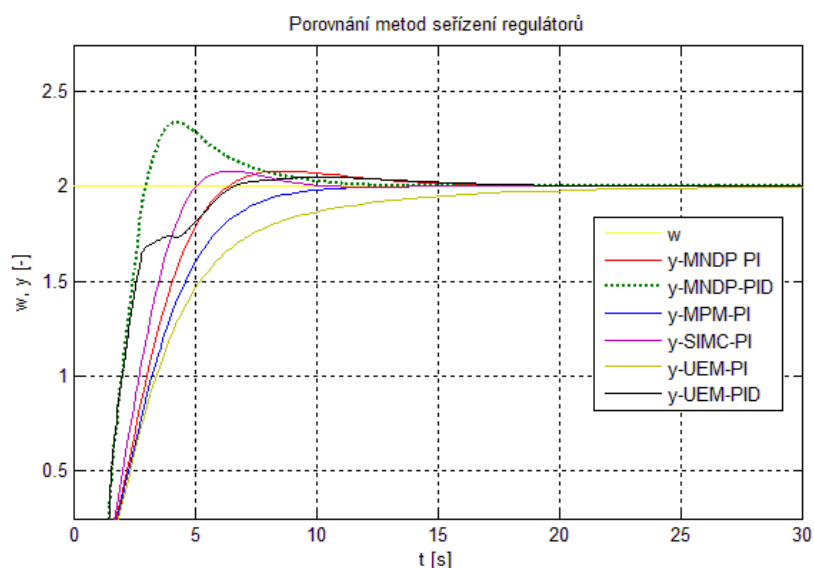
Tab. 7 Hodnoty kritéria ITAE při simulacích s navrženými regulátory

Metoda	Typ regulátoru	I_{ITAE} s kompenzací	I_{ITAE} bez kompenzace
Metoda požadovaného modelu [$\kappa=0\%$]	PI	24002	24319
Univerzální experimentální metoda [$\kappa=0\%$]	PI	26580	26609
	PID	20489	20936
SIMC	PI	21375	21933
Metoda násobného dominantního pólu	PI	22383	22663
	PID	19146	19770

Číslicové simulace jasně potvrdily očekávaný výsledek, že přístup s použitím kompenzace je výhodnější, simulace mají vždy kratší dobu regulace a minimální nebo nulový překmit. Dalším důkazem je také nižší hodnota kritéria ITAE. V případě metody bez kompenzace dosahuje regulovaná veličina rozdílných hodnot překmitů a dob regulace v závislosti na tom, jak se mění pracovní bod. Čím více se žádaná hodnota blíží k pracovnímu bodu, při kterém byl nastaven regulátor, tím se doba regulace a překmit snižují. Tato skutečnost potvrzuje očekávané výsledky plynoucí z předchozí teorie obou použitých přístupů. Průběh simulace s PI regulátory seřízenými podle Metody požadovaného modelu je zobrazen na Obr. 55. Porovnání číslicových simulací s regulátory seřízenými podle všech metod pro přístup s kompenzací je zobrazen, viz Příloha A.



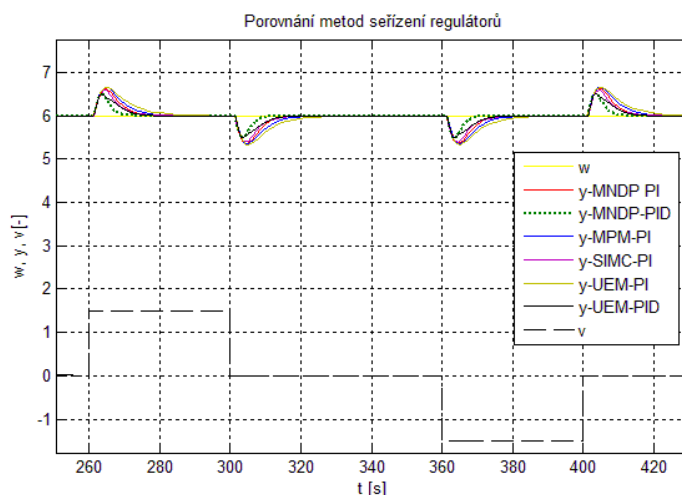
Obr. 55 Metoda požadovaného modelu-PI-porovnání simulace bez kompenzace a s kompenzací nelinearity



Obr. 56 Porovnání číslicových simulací s parametry regulátorů z Tab. 6

Z výsledků číslicových simulací s parametry regulátorů z Tab. 6 vyplývá, že nejvhodnější pro použití při regulaci na reálném modelu z hlediska kritéria ITAE je PID regulátor seřízený podle Metody násobného dominantního pólu. Při testování robustnosti dosahoval takto seřízený regulátor nejlepší reakce na změnu poruchové veličiny, doba regulace byla jedna z nejkratších, překmit byl však nejvyšší ze všech metod. Další v pořadí nejlepší regulátor byl PID regulátor s parametry seřízenými podle Univerzální experimentální metody, hodnota kritéria ITAE byla druhá nejnižší, regulovaná veličina měla mírný překmit, reakce na poruchovou veličinu byla taktéž druhá nejlepší. Z PI regulátorů dosahoval nejnižší hodnoty kritéria ITAE regulátor seřízený podle metody SIMC, regulovaná veličina měla druhý nejvyšší překmit, doba regulace byla průměrná. Nejméně dobře seřízený regulátor byl PI

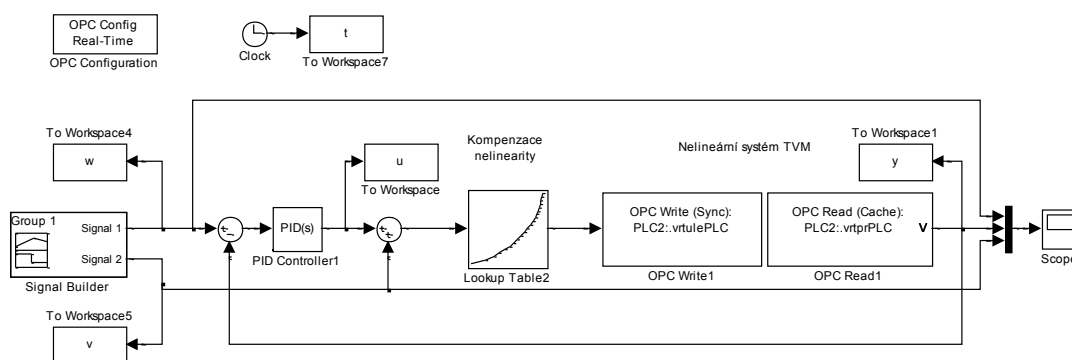
regulátor navržený pomocí Univerzální experimentální metody, měl nejvyšší hodnotu dle kritéria ITAE, jeho doba regulace byla nejvyšší, regulovaná veličina dosahovala nulového překmitu a takto seřízený regulátor měl i nejhorší výsledky při testování z hlediska robustnosti. Porovnání všech metod z hlediska reakce na poruchovou veličinu je zobrazeno na Obr. 57.



Obr. 57 Porovnání metod seřizení regulátorů-reakce na poruchu

4.4 Měření na reálném laboratorním modelu

Předchozí podkapitoly se zabývaly syntézou nelineárních systémů řízení, návrhem parametrů regulátorů a simulací navrženého řízení. Tato část práce se zabývá ověřením správnosti návrhu řízení přímo na laboratorní úloze teplovzdušného modelu. Konfigurace a řízení úlohy bylo zajištěno pomocí programu MATLAB Simulink. Schéma řízení úlohy je znázorněno na Obr. 58. Na laboratorní úloze byl ověřen přístup syntézy s kompenzací nelinearity a bez kompenzace nelinearity. Při regulaci byly použity vypočtené parametry regulátorů z Tab. 6. Byly porovnány průběhy regulovaných veličin pro jednotlivé regulátory z hlediska kvality regulace.

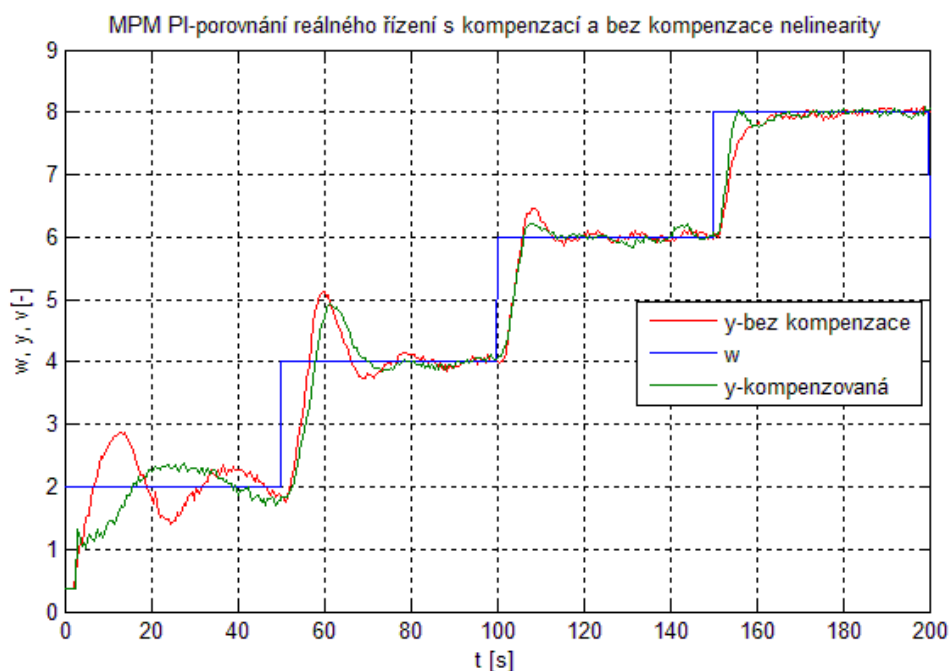


Obr. 58 Schéma řízení úlohy teplovzdušného modelu

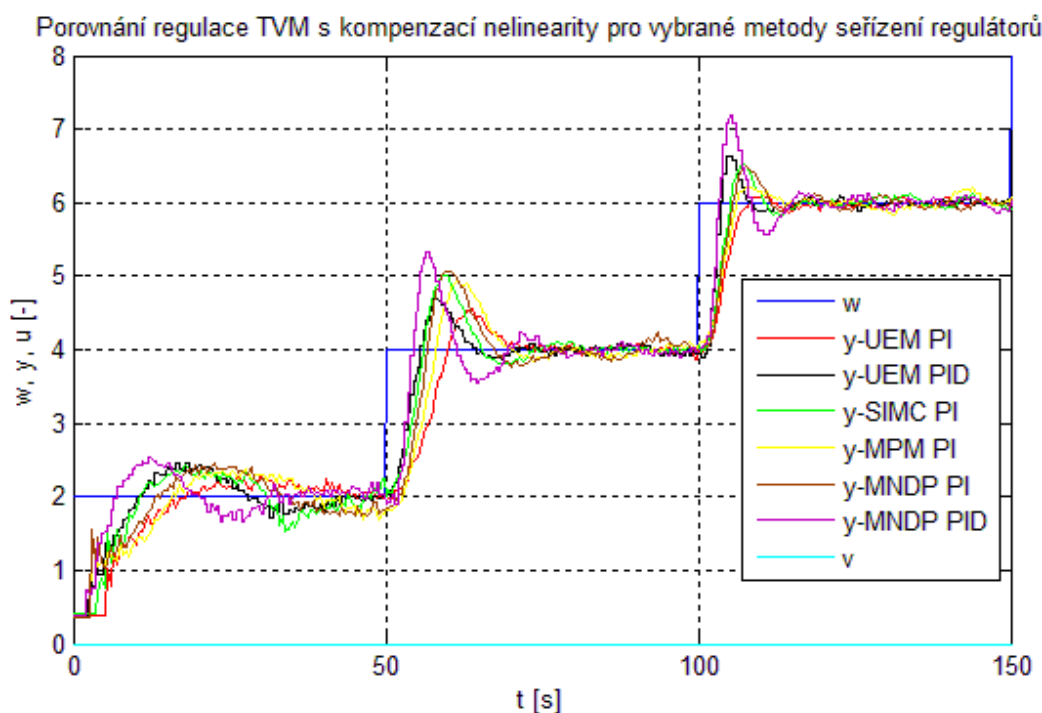
Tab. 8 Hodnoty kritéria ITAE při měření s TVM pro jednotlivé regulátory

Metoda	Typ regulátoru	I_{ITAE} s kompenzací	I_{ITAE} bez kompenzace
Metoda požadovaného modelu [$\kappa=0\%$]	PI	35426	35931
Univerzální experimentální metoda [$\kappa=0\%$]	PI	36424	37829
	PID	31721	31863
SIMC	PI	33517	33556
Metoda násobného dominantního pólu	PI	34712	34754
	PID	33287	33331

Nejprve byl na reálném modelu ověřen teoretický předpoklad, že použití bloku s kompenzací nelinearity v regulačním obvodu zlepšuje kvalitu regulace. Důkazem správnosti tohoto předpokladu je Obr. 59, který vykresluje porovnání regulace s kompenzací a bez kompenzace nelinearity s použitím PI regulátoru seřízeného pomocí Metody požadovaného modelu. Z grafu je zřejmé, že při použití kompenzačního bloku jsou překmity regulované veličiny nižší než bez kompenzace a je zde také nižší doba regulace. Průběhy porovnání regulací TVM s kompenzací nelinearity pro použité metody seřízení regulátorů jsou zobrazeny viz Příloha B. Pro hodnocení kvality regulace s jednotlivými navrženými regulátory byly opět vypočítány hodnoty integrálního kritéria ITAE, které jsou zpracovány v Tab. 8.



Obr. 59 Metoda požadovaného modelu-porovnání reálného řízení bez kompenzace a s kompenzací nelinearity



Obr. 60 Porovnání regulace TVM s kompenzací nelinearity pro vybrané metody seřízení regulátorů

Pokud porovnáme hodnoty ITAE navržených regulátorů mezi sebou, nejlepších výsledků při regulaci na reálném modelu dosáhl PID regulátor seřízený podle Univerzální experimentální metody. Při testování robustnosti dosahoval druhé nejlepší reakce na změnu poruchové veličiny, měl krátkou dobu regulace, překmit byl druhý nejvyšší ze všech metod. Další v pořadí nejlepší regulátor byl PID regulátor s parametry seřízenými podle Metody násobného dominantního pólu, hodnota kritéria ITAE byla druhá nejnižší, regulovaná veličina měla největší překmit ze všech metod, regulátor dobře reagoval na poruchovou veličinu. Z PI regulátorů dosahoval nejnižší hodnoty kritéria ITAE regulátor seřízený podle metody SIMC, stejně jako tomu bylo u číslicové simulace, doba regulace byla průměrná. Nejhorších výsledků dosáhl PI regulátor navržený pomocí Univerzální experimentální metody, měl nejvyšší hodnotu dle kritéria ITAE, jeho doba regulace byla nejvyšší, takto seřízený regulátor měl i nejhorší výsledky při testování z hlediska robustnosti. Pokud porovnáme výsledky číslicových simulací a reálného měření na TVM, můžeme konstatovat, že číslicová simulace dostatečně přesně modeluje chování reálné úlohy, regulátory, které dosáhly nejlepších výsledků u simulace, dosáhly nejlepších výsledků také u měření na reálném TVM. To samé platí pro nejhůře seřízené regulátory.

5 ZÁVĚR

Tato práce se zabývala teorií nelineárních systémů. V úvodní části práce byla nejprve teoreticky rozebrána problematika nelineárních systémů a byly popsány základní typy nelinearity. Dále v práci byly vysvětleny metody pro modelování nelineárních systémů za použití Hammersteinova a Wienerova modelu. Na třech zvolených příkladech byl navržen Hammersteinův model systému, poté byla pomocí číslicové simulace ověřena správnost návrhu modelů. U všech tří příkladů bylo z výsledných grafů zřejmé, že nelinearity vyskytující se v popisovaných nelineárních systémech byly vykompenzovány a na výslednou statickou charakteristiku měly minimální vliv. Výsledné Hammersteinovy modely se chovaly jako lineární.

Dále byl v práci popsán System Identification Toolbox programu MATLAB a jeho použití při experimentální identifikaci nelineárních systémů. Jako model pro ověření funkčnosti toolboxu byl použit nelineární systém z příkladu 3. Poté byl pomocí System Identification Toolboxu identifikován reálný nelineární systém. Jednalo se o laboratorní úlohu teplovzdušného modelu, pro identifikaci byl využit subsystém otáček ventilátoru. Postupně byly na vstup systému přiváděny různé typy signálů a byly zaznamenány jejich odezvy. Jednalo se vždy o modely nelineárního systému se strukturou ve tvaru Hammersteinova modelu. Těchto modelů bylo dosaženo na základě mnoha opakovaných simulací, kdy byly postupně laděny parametry Identification Toolboxu. Nakonec byly vybrány nejlepší tři matematické modely a byla ověřena správnost jejich návrhu. Z naměřených výsledků byl učiněn závěr, že žádný ze tří vytvořených modelů nelze považovat za kvalitně simulující. Nedostatečná kvalita simulace je nejspíše způsobena vlastnostmi teplovzdušného modelu, resp. ze zadaných vstupních a naměřených výstupních dat se metodami, které využívá System Identification Toolbox nepodařilo zjistit dostatek informací o TVM. Další možnou příčinou je nevhodně použitý snímač otáček ventilátoru TVM, kdy snímač není díky své konstrukci schopen dostatečně rychle zaznamenávat změny v otáčení ventilátoru. Z těchto skutečností se nabízí závěr, že System Identification Toolbox není vhodný pro identifikaci teplovzdušného modelu Hammersteinovým modelem a je nutno použít jiný přístup identifikace.

Jelikož se mi nepodařilo vytvořit dostatečně přesný simulační model systému s využitím System Identification Toolboxu pro Hammersteinův model, byl k identifikaci použit klasický přístup. Jednalo se o identifikaci systému na základě aproximace přechodové charakteristiky dvoubodovou metodou s dopravním zpožděním. Nejdříve byla identifikována lineární

dynamická část nelineárního systému, poté následovalo měření statické charakteristiky popisující nelineární statickou část systému, tak aby výsledný model systému odpovídal struktuře Hammersteinova modelu. Nakonec byla simulačně ověřena funkčnost takto navrženého modelu. Model správně modeloval chování reálné úlohy a byl proto použit pro simulaci regulačních obvodů v další části práce.

Následující část práce se zabývala syntézou nelineárních systémů řízení. Byly popsány dva základní přístupy k syntéze, vhodné zvláště v případě, kdy lze nelineární systém popsat pomocí Hammersteinova nebo Wienerova modelu. Prvním přístup používal blok pro kompenzaci nelinearity statické charakteristiky nelineárního systému, druhý přístup na rozdíl od předchozího tento kompenzační blok neobsahoval. Pro demonstraci obou variant přístupů byly provedeny simulace regulací. V regulačních obvodech byly použity regulátory vypočtené na základě Metody požadovaného modelu, Univerzální experimentální metody, Metody SIMC a Metody násobného dominantního pólu. Z výsledků je jasné patrné, že lepších výsledků z hlediska kvality regulace dosahují regulační obvody s blokem pro kompenzaci nelinearity. Průběhy regulované veličiny při této metodě mají vždy kratší dobu regulace a minimální nebo nulový překmit. V případě metody bez kompenzace dosahuje regulovaná veličina rozdílných hodnot překmitů a dob regulace v závislosti na tom, jak se mění pracovní bod. Čím více se žádaná hodnota blíží k pracovnímu bodu, při kterém byl nastaven regulátor, tím se doba regulace a překmit snižují. Tato skutečnost potvrzuje očekávané výsledky plynoucí z předchozí teorie obou použitých přístupů. Ze zpracovaných výsledků simulace jasně vyplývá, že přístup s použitím kompenzace nelinearity je pro použití v regulačním obvodu výhodnější.

Poté byla simulačně testována dosažená kvalita regulace v časové oblasti v obvodu s kompenzací nelinearity s regulátory seřízenými podle jednotlivých metod. Průběhy regulovaných veličin byly odlišné dle teoretických předpokladů pro dané metody seřízení. Všechny použité metody garantují překmit regulované veličiny do 5%. Z výsledků číslicových simulací s parametry regulátorů vyplývá, že nejvhodnější pro použití při regulaci na reálném modelu z hlediska kritéria ITAE je PID regulátor seřízený podle Metody násobného dominantního pólu. Při testování robustnosti dosahoval takto seřízený regulátor nejlepší reakce na změnu poruchové veličiny, doba regulace byla jedna z nejkratších, překmit byl však nejvyšší ze všech metod. Další v pořadí nejlepší regulátor byl PID regulátor s parametry seřízenými podle Univerzální experimentální metody, hodnota kritéria ITAE byla druhá nejnižší, regulovaná veličina měla mírný překmit, reakce na poruchovou veličinu byla taktéž druhá nejlepší. Z PI regulátorů dosahoval nejnižší hodnoty kritéria ITAE regulátor

seřizený podle metody SIMC, regulovaná veličina měla druhý nejvyšší překmit, doba regulace byla průměrná. Nejméně dobře seřizený regulátor byl PI regulátor navržený pomocí Univerzální experimentální metody, měl nejvyšší hodnotu dle kritéria ITAE, jeho doba regulace byla nejvyšší, regulovaná veličina dosahovala nulového překmitu a takto seřizený regulátor měl i nejhorší výsledky při testování z hlediska robustnosti.

Nejprve byl na reálném modelu ověřen teoretický předpoklad, že použití bloku s kompenzací nelinearity v regulačním obvodu zlepšuje kvalitu regulace. Z výsledků je zřejmé, že při použití kompenzačního bloku jsou překmity regulované veličiny nižší než bez kompenzace a je zde také kratší doba regulace. Pokud porovnáme hodnoty ITAE navržených regulátorů mezi sebou, nejlepších výsledků při regulaci na reálném modelu dosáhl PID regulátor seřizený podle Univerzální experimentální metody. Při testování robustnosti dosahoval druhé nejlepší reakce na změnu poruchové veličiny, měl krátkou dobu regulace, překmit byl druhý nejvyšší ze všech metod. Další v pořadí nejlepší regulátor byl PID regulátor s parametry seřizenými podle Metody násobného dominantního pólu, hodnota kritéria ITAE byla druhá nejnižší, regulovaná veličina měla největší překmit ze všech metod, regulátor dobře reagoval na poruchovou veličinu. Z PI regulátorů dosahoval nejnižší hodnoty kritéria ITAE regulátor seřizený podle metody SIMC, stejně jako tomu bylo u číslicové simulace, doba regulace byla průměrná. Nejhorších výsledků dosáhl PI regulátor navržený pomocí Univerzální experimentální metody, měl nejvyšší hodnotu dle kritéria ITAE, jeho doba regulace byla nejdelší, takto seřizený regulátor měl i nejhorší výsledky při testování z hlediska robustnosti. Pokud porovnáme výsledky číslicových simulací a reálné regulace na TVM, můžeme konstatovat, že číslicová simulace dostatečně přesně modeluje chování reálné úlohy, regulátory, které dosáhly nejlepších výsledků u simulace, dosáhly nejlepších výsledků také u měření na reálném TVM. To samé platí pro nejhůře seřizené regulátory.

Jako další směr práce se nabízí použití prediktivních regulátorů při syntéze a aplikace získaných poznatků v jiných laboratorních úlohách s podobnými nelineárními statickými charakteristikami.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

ALLIEDELEC, 2015. *Katalog produktů*. [online]. [cit. 2015-29-1]. Dostupné z [www:<URL: http://www.alliedelec.com/sunon-fans-kd1208pts1-13-gn/70225894/>](http://www.alliedelec.com/sunon-fans-kd1208pts1-13-gn/70225894/)

ATŘ, 2015. *Matematické metody používané v oblasti automatizace a řízení*. Sylaby, elektronické učebnice. [online]. [cit. 2015-29-1]. Dostupné z [www:<URL: http://books.fs.vsb.cz/MatMet/Kapitoly/Kap9.htm/>](http://books.fs.vsb.cz/MatMet/Kapitoly/Kap9.htm/)

BABÍK, Z. 2012. *Využití Hammersteinova a Wienerova modelu při diskretním adaptivním řízení nelineárních procesů*. [online]. [cit. 2015-12-02]. Dostupné z [www:<URL: http://trilobit.fai.utb.cz/vyuziti-hammersteinova-a-wienerova-modelu-pri-diskretnim-adaptivnim-rizeni-nelinearnich-procesu_079aeb04-15a5-45a1-9413-8cbcde4eb93c>](http://trilobit.fai.utb.cz/vyuziti-hammersteinova-a-wienerova-modelu-pri-diskretnim-adaptivnim-rizeni-nelinearnich-procesu_079aeb04-15a5-45a1-9413-8cbcde4eb93c)

BALÁTEŠ, J. 2003. *Automatické řízení*. Praha: Nakladatelství BEN, 2003, 654 s. ISBN 80-7300-020-2

BOBÁL, V. 2008 *Adaptivní a prediktivní řízení*. Vyd. 1. Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2008, 134 s. ISBN 978-80-7318-662-3.

BRÁZDIL, M. 2011. *Identifikace a řízení nelineárního systému pomocí Hammersteinova modelu*. [online]. [cit. 2015-12-02]. Dostupné z [www:<URL: http://www.posterus.sk/?p=10422>](http://www.posterus.sk/?p=10422)

BUCHTA, R. 2007. *Modulární programovatelný automat AC500*. Automa. 2007, 03, s.1. Dostupný také z [www:<URL: http://automa.cz/index.php?id_document=34212>](http://automa.cz/index.php?id_document=34212)

DOSTÁL, P. & MATUŠŮ, R. 2010. *Stavová a algebraická teorie řízení*. Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2010. ISBN 978-80-7318-991-4.

FOXON-CZ, 2015. *Co je OPC, OPC server, OPC klient?* [online]. [cit. 2015-5-1]. Dostupné z [www:<URL: http://www.foxon.cz/cs/blogs/80-co-je-opc-opc-server-opc-klient-.html/>](http://www.foxon.cz/cs/blogs/80-co-je-opc-opc-server-opc-klient-.html/)

GME, 2015. *Katalog produktů*. [online]. [cit. 2015-1-1]. Dostupné z [www:<URL: http://www.gme.cz/termistor-ntc-ntc-640-3k3-p118-084/>](http://www.gme.cz/termistor-ntc-ntc-640-3k3-p118-084/)

HRABOVSKÝ, J. 2013. *Nelineární řízení v Matlabu*. Zlín: fakulta aplikované informatiky, UTB Zlín, 2013. 80 stran. Diplomová práce, vedoucí: Vojtěšek, J.

HÝL, R. 2013. *Využití PLC pro řízení laboratorního modelu s možností vizualizace: diplomová práce*. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, Fakulta Strojní, Katedra automatizační techniky a řízení, 2013, Vedoucí práce: Škuta, J.

INDUSTRIAL PARTNERS, 2015. *Katalog produktů*. [online]. [cit. 2015-21-1]. Dostupné z www:<URL: <http://www.industrialpartners.eu/de/projects/pd/skalierbare-sps-ac500-produktdesign.html>>

MAREŠ, L. 2006. *Teplota a její měření*. [online]. [cit. 2015-20-1]. Dostupné z www:<URL: <http://www.tzb-info.cz/3115-teplota-a-jeji-mereni>>

NELLES, O. 2001. *Nonlinear system identification: from classical approaches to neural networks and fuzzy models*. New York: Springer, c2001, xvii, 785 p. ISBN 3540673695-.

NOSKIEVIČ, P. 1999 *Modelování a identifikace systémů*. Ostrava: Montanex a. s. Ostrava, 1999. 275 s. ISBN 80-7225-030-2.

ŠEBEK, M. 2013. *Nelineární systémy a řízení*. [online]. [cit. 2015-12-01]. Studijní materiál ČVUT. Praha 2013. Dostupné z www:<URL: http://www.polyx.com/_ari/slajdy/Bas-ARI-26-Nonlinear.pdf>

VÍTEČEK, A., SMUTNÝ, L. KUSYN, J. 1988. *Teorie řízení III*. Ostrava: VŠB-TU Ostrava, Fakulta strojní a elektrotechnická, 1988. 56 s.

VÍTEČKOVÁ, M. 2014. *Nelineární systémy*. Materiály pro studenty kombinované formy studia, Ostrava 2014, 67 stran.

VÍTEČKOVÁ, M. & VÍTEČEK, A. 2008 *Základy automatické regulace*. 2. přepracované vydání. Ostrava: VŠB-TU Ostrava, 246 stran. 2008. ISBN 978-80-248-1924-2.

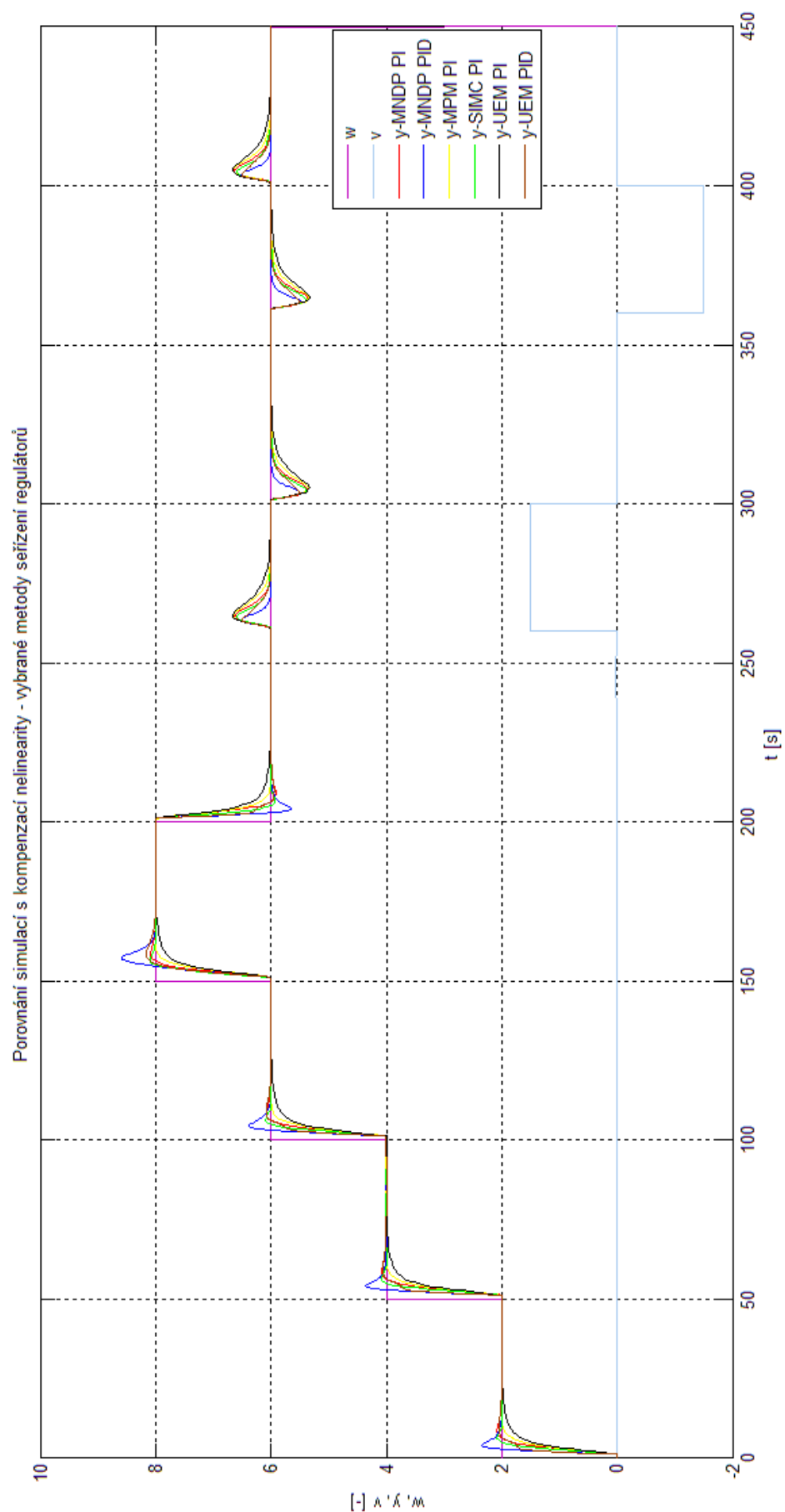
VOJÁČEK, A. 2011. *Programovací režimy pro PLC dle IEC 61131-3 (CoDeSys)*. [online]. [cit. 2015-1-03]. Dostupné z www:<URL: <http://automatizace.hw.cz/programovaci-rezimy-pro-plc-dle-iec-611313-codesys>>

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha A - Porovnání číslicových simulací s kompenzací nelinearity pro vybrané metody seřízení regulátorů s. 51

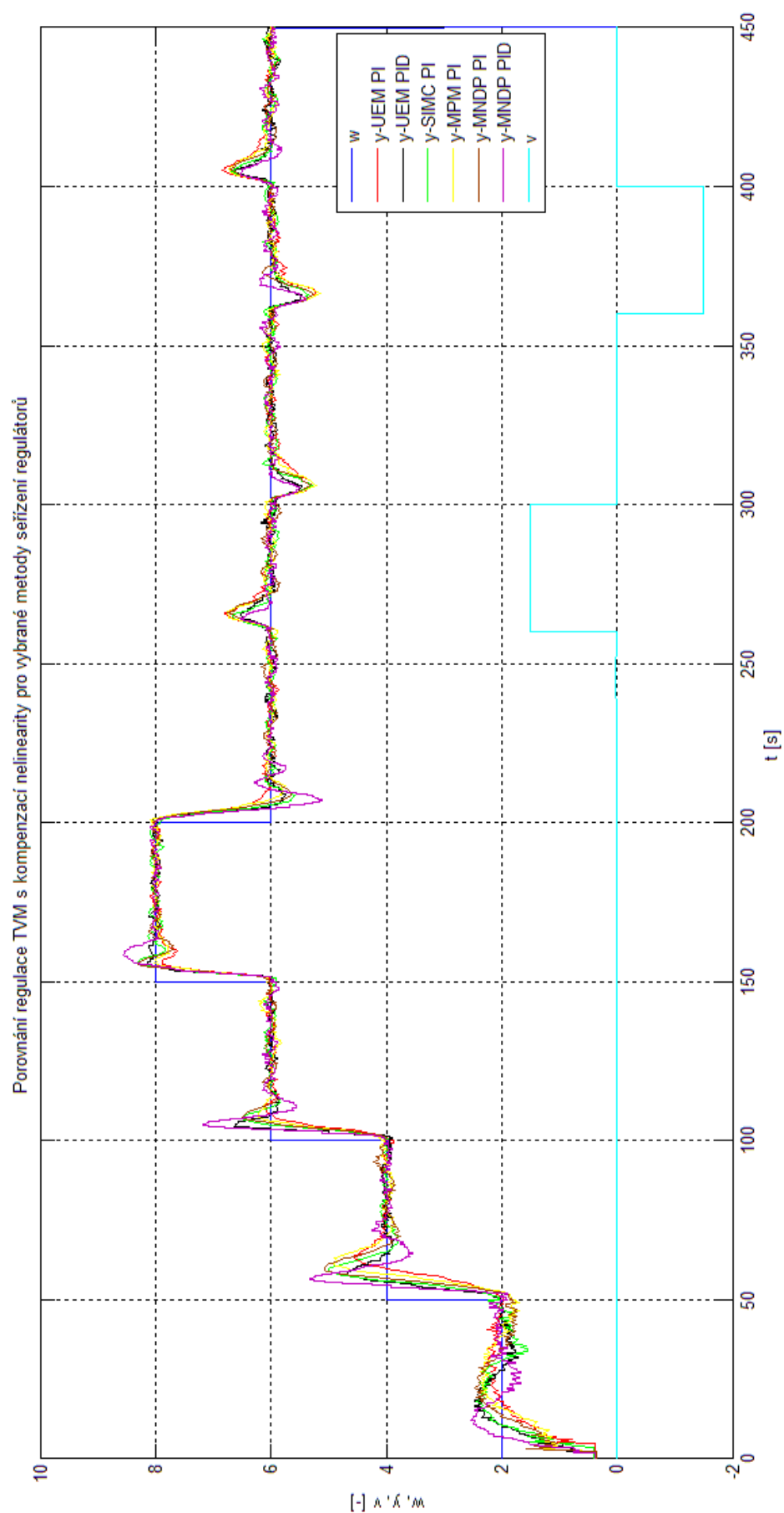
Příloha B - Porovnání regulací TVM s kompenzací nelinearity pro vybrané metody seřízení regulátorů s. 54

Příloha A - Porovnání číslcových simulací s kompenzací nelinearity pro
vybrané metody seřízení regulátorů



Porovnání číselných simulací s kompenzací nelinearity pro vybrané metody seřízení regulátorů

Příloha B - Porovnání regulací TVM s kompenzací nelinearity pro vybrané metody seřízení regulátorů



Porovnání regulací TVM s kompenzací nelinearity pro vybrané metody seřízení regulátorů